



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

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

№2 2026 р.

2(165)' 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

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

Прогнозування вторинних оцінок параметрів
сигналу тестування обмотки статора трифазного
асинхронного електродвигуна

..... 4

NERUBATSKYI V. P.

Research into methods and means of controlling
brushless traction motors of locomotives based on
modern power converters

..... 14

РИБАЛЬЧЕНКО Л. І.

Трансформація управління вантажопотоками на
залізниці на основі цифрових платформ

.....46

СЕМЕНЕНКО Ю. О., СИСОЄВ Ю. О., СЕМЕНЕНКО
О. Д., СТЕПАНЕНКО Д. Р., СОРОКА А. С.,
ШИРОКИЙ Ю. В.

Енергоефективні алгоритми обробки сенсорної
інформації для наземних роботизованих систем
різного призначення

.....53

ХІСМАТУЛІН В. Ш., САГАЙДАЧНИЙ В. Г., ПЕЛЕХ В. Р.
Обґрунтування інтервалу оновлення координатної інформації про стан рухомих одиниць у координатних системах регулювання

.....67

ШЕВЧЕНКО В. І., МАЦІЄВСЬКИЙ Б. В., СУМЕЦЬ М. С.
Розроблення окремих положень до «Інструкції про порядок передачі вантажних вагонів в оренду» і «Порядку проведення електронних торгів з оренди рухомого складу»

.....73

ЛОМОТЬКО Д. В., ІЛЬЧИШИН В. М., ГРУНИК І. С., СЕРГЄЄВ В. С., НЕСТЕРЕНКО О. О.

Удосконалення функціонування прикордонного залізничного вузла через стохастичне моделювання на основі мереж петрі

.....80

КИМАН А. М., ПРОХОРЧЕНКО Г. О., КРАВЧЕНКО М. А.

Розроблення методу інтеграції операційних даних залізничної мережі з графовою структурою плану формування поїздів

.....91

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

Efficiency evaluation of a code division multiple access system based on a multilevel functional model of performance indicators

.....105

КАГРАМАНЯН А. О., РЕЗУНЕНКО М. Є., ПАНЧЕНКО Н. Г., ОБОЗНИЙ О. М.
Розроблення концепції автоматизованої системи прогнозування викидів дизелів тепловозів з урахуванням реальних умов експлуатації

.....113

ФІЛІМОНЧУК Т. В., КОЛТУН Ю.М., МАСЛОВ М.К. Адаптивна модель розпізнавання техніки з механізмами уваги на базі YOLOv11	121
DIŽO J., BUČKO M., BLATNICKÝ M., SLUŠŇÁK P. Dynamic analysis of a suburban railway vehicle	137
ПРОХОРОВ В.М., ПАРХОМЕНКО Л.А., КРАВЧЕНКО М.А., КАЛАШНИКОВА Т.Ю. Застосування часових мереж Петрі як обчислювального ядра цифрового двійника на прикладі задачі побудови розкладу залізничної мережі з крос-докінгом	144

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

Прогнозування вторинних оцінок параметрів сигналу тестування обмотки статора трифазного асинхронного електродвигуна

Для визначення поточних величин активного та реактивного опорів обмотки статора асинхронного електродвигуна вимірюють параметри пропущеного крізь неї тестового струму. Описано процедуру прогнозування вторинних оцінок величин цих параметрів при нерівноточному та нееквідистантному в часі їх вимірюванні. Отримано вираз для розрахунку дисперсії спрогнозованої величини при згладжуванні послідовності вторинних оцінок довільними детермінованими функціями часу. Цей вираз конкретизовано для випадку поліноміального згладжування.

Ключові слова: оцінка параметрів, первинна оцінка, вторинна оцінка, згладжування, дистанція прогнозу, дисперсія.

Вступ

В тягових приводах рухомих засобів електротранспорту широко застосовують трифазні асинхронні електродвигуни. Ступінь їхньої працездатності визначає експлуатаційну придатність вказаних засобів. Зі свого боку, технічний стан обмотки статора такого двигуна як його принципово необхідного елемента конструкції визначальним чином впливає на працездатність і експлуатаційні характеристики власне двигуна. Величини активного і реактивного опорів обмотки статора несуть інформацію як про стан її провідників та ізоляції, так і про поточну температуру двигуна. Вказані опори можуть бути виміряні в процесі його роботи шляхом введення в коло обмотки малої тестової напруги з відомими формою та параметрами і в подальшому вимірюванні параметрів створеного нею струму. Отримані в такий спосіб первинні оцінки мають певні відхилення від істинних величин вимірюваних параметрів з причини дії завад на датчики. Це утруднює виявлення тенденції зміни параметрів обмотки в часі. Для розв'язання цієї задачі виконують згладжування часової послідовності первинних оцінок, отримуючи з неї часову послідовність вторинних оцінок, величини яких задовольняють певній достатньо гладкій аналітичній функції. Знання виду та параметрів цієї функції дає змогу спрогнозувати її числову величину (а відтак – і числову величину вимірюваного параметру обмотки) на деякий проміжок часу. Звідси утворюється передумова для обґрунтованого визначення терміну та виду технічного обслуговування двигуна, маючи на меті мінімізацію технічних, організаційних і фінансових витрат.

Отже, розв'язання задачі стійкого до похибок первинних вимірювань прогнозного визначення величин діагностичних параметрів двигуна в умовах жорсткого ресурсозбереження є високоактуальним.

Постановка проблеми й аналіз досліджень і публікацій

Використання тестового сигналу для визначення через його параметри комплексного опору обмотки статора асинхронного електродвигуна та обмотки будь-якої котушки індуктивності взагалі надає фізичну можливість слідкувати як за технічним станом власне цієї обмотки, так і за температурним режимом двигуна в цілому. Відомі з класичної теорії електричних кіл співвідношення для розрахунку вказаного опору та втрат у реальній котушці індуктивності [1] набули розвитку на базі розширення можливостей вимірювань і оброблення їх результатів, а також досягнень в теорії електричних машин.

Так, метод визначення комплексного опору котушки індуктивності, базований на диференціації втрат в ній (включно із втратами в ізоляції) залежно від вигляду струму, що протікає, подано в роботі [2]. Можливості застосування цього методу обмежені необхідністю проведення вимірювань поза робочим режимом. Метод оцінювання параметрів електричної машини включно із опором статора під час її роботи описаний в статті [3]. Він забезпечує визначення миттєвої величини активного опору за будь-якого режиму роботи машини, однак за суттю є інструментом визначення лише первинних оцінок.

Слід зазначити, що має місце певне розмежування між фізичним визначенням активних опорів та індуктивностей, щодо яких відбувається обчислення.

Частина робіт присвячена визначенню не безпосередньо опорів та індуктивностей технічних елементів конструкції, а величин параметрів схеми заміщення багатофазних асинхронних машин згідно зі стандартом 112 IEEE [4]. Такий підхід описаний в роботі [5], присвяченій визначенню вказаних величин в широкому діапазоні частот живильної напруги. Однак у відповідному експерименті були досліджені не наслідки нагрівання двигуна струмами, що утворюються в процесі його роботи, а наслідки зовнішнього нагрівання зупиненого двигуна в пічці з регульованою температурою. Водночас відомо, що наявність активних опорів обмоток двигуна є основною причиною його самонагрівання. Воно, зі свого боку, обумовлює зміну цього опору в часі по мірі прогріву двигуна. Виявлено, що вказаний опір суттєво впливає також на швидкість обертання валу [6] та на обертовий момент [7]. Це знов повертає увагу дослідників до необхідності відслідковувати опір обмотки статора в реальному масштабі часу як базовий елемент розрахунку інших параметрів робочого режиму, використовуючи додавання малого каліброваного сигналу до функціонально основного живильного струму [8-12]. Втім вказані роботи описують засоби отримання знову ж таки первинних оцінок і не торкаються питання прогнозування їхніх величин. Останнім часом опубліковано деякі роботи, що частково заповнюють цей пробіл. Так, у статті [13] розглянуто прогнозування стану ізоляції асинхронного двигуна в умовах флуктуацій та модуляції живильної напруги, а в статті [14] описано прогнозування власної індуктивності еталону індуктивності. Однак в першій з цих статей розглянуто довготермінову перспективу впливу врахованих чинників, величина якої не охоплює потреб оперативного прогнозування; в обох статтях не враховано індивідуальності величини дисперсії кожного з вимірювань, хоча друга з них і надає інструмент оперативного прогнозування.

Зазначимо, що останню властивість має будь-який метод екстраполяції за допомогою неперервних функцій часу [15, 16], проте ці дві останні роботи теж не враховують індивідуальних статистичних характеристик кожної окремої первинної оцінки. Перехід до розгляду послідовності первинних оцінок як стохастичного процесу приносить певні позитивні результати, коли він поєднується з прогнозуванням на базі методів глибокого машинного навчання [17-19]. Але й ці методи, принаймні описані у відкритому доступі на сьогодні, теж не вільні від вказаного вище обмеження. Певного ослаблення впливу розкиду величин дисперсій первинних оцінок сягають застосуванням перетворення Бокса-Кокса [20], яке за суттю є нелінійним перетворенням числових величин

кожної послідовності первинних оцінок, призначеним для стабілізації величини дисперсії.

Однак ця стабілізація фактично призводить до втрати інформації щодо вагомості внеску кожної оцінки в підсумкову точність результату, і в підсумку «перетворені» первинні оцінки мають майже однаковий вплив на результат, оскільки в них тепер майже однакові дисперсії.

Отже, на сьогодні розроблено та опубліковано обсяжний апарат опису еквівалентної схеми асинхронного електродвигуна із урахуванням комплексного опору обмотки його статора. Доволі детально проаналізовано вплив активної складової цього опору на температурний режим двигуна, його обертовий момент та швидкість обертання на коротких інтервалах часу, прилеглих до моменту вимірювання цього опору. Існують також певні експериментальні напрацювання щодо проведення таких вимірювань на базі вимірювання параметрів тестового струму, штучно введеного до обмотки статора (так званих первинних оцінок). Окремо є широко розвиненим математичний апарат екстраполяції стаціонарних функцій часу на заданий інтервал майбутнього часу (тобто прогнозування майбутніх числових значень, які прийматимуть ці функції). Але не вдалося виявити публікацій, в яких було б описано прогнозування послідовності вторинних оцінок параметрів тестового сигналу (тобто згладженої послідовності первинних оцінок) із врахуванням змінної в часі дисперсії первинних оцінок. Розв'язання цієї задачі дало б змогу отримувати теоретично обґрунтовані попередження щодо загроз технічному стану двигуна та щодо необхідності його технічного обслуговування.

Мета та задачі дослідження

Мета дослідження – розроблення теоретично обґрунтованої процедури прогнозування послідовності вторинних оцінок параметрів тестового струму статора трифазного асинхронного електродвигуна за умови нерівності дисперсій первинних оцінок параметрів цього струму.

Для досягнення поставленої мети було розв'язано три задачі:

- 1) перетворення процедури згладжування первинних оцінок на процедуру прогнозування вторинних оцінок;
- 2) аналітичне визначення дисперсії спрогнозованої величини для загального випадку згладжування детермінованими функціями часу;
- 3) конкретизація аналітичного виразу для величини вказаної дисперсії в широко розповсюдженному випадку поліноміального згладжування.

Основна частина

Перетворення процедури згладжування на процедуру прогнозування

Розглянемо ситуацію, в якій проведені на K послідовних інтервалах часу вимірювання дали послідовність $\hat{\lambda}_k$ первинних оцінок певного параметру тестового сигналу, де $k = 1, 2, \dots, K$. Частина вказаних інтервалів уражена короткочасною імпульсною завадою. Кількість цих інтервалів дорівнює K_1 , їхні номери утворюють множину \mathcal{K}_1 ; дисперсія отриманих первинних оцінок дорівнює σ_1^2 . Інші $K_0 = K - K_1$ інтервалів уражені тільки стаціонарним неперервним шумом, їхні номери утворюють множину \mathcal{K}_0 ; дисперсія отриманих первинних оцінок дорівнює σ_0^2 . Більш детально така ситуація описана в роботі [21]; технічні засоби, що забезпечують отримання первинних оцінок з розглянутими властивостями описані в роботі [22]. Якщо для згладжування часової послідовності первинних оцінок використано зважену суму, складену з M повністю відомих функцій часу $F_m(t)$ (де $m = 1, 2, \dots, M$), то послідовність отриманих у такий спосіб вторинних оцінок λ_k утворює вектор

$$\vec{\lambda}^* = \vec{F}^T \vec{\alpha}^* \quad (1)$$

Тут \vec{F} є матрицею $\|F_{mk}\|$, складеною з числових значень $F_m(t_k)$ вказаних відомих функцій, зафіксованих в моменти t_k ($k = 1, 2, \dots, K$); $\vec{\alpha}^*$ є вектором вагових коефіцієнтів. У роботі [21] показано, що він обчислюється як

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

Тут підматриці \vec{F}_0 та \vec{F}_1 є результатами фрагментування матриці \vec{F} відповідно до групування номерів інтервалів часу на множини \mathcal{K}_0 та \mathcal{K}_1 : $\vec{F}_0 = \|F_{mk}\| (k \in \mathcal{K}_0)$ та $\vec{F}_1 = \|F_{mk}\| (k \in \mathcal{K}_1)$. Підвектори $\hat{\lambda}_0$ та $\hat{\lambda}_1$ є результатами фрагментування вектора $\hat{\lambda}$ первинних

оцінок за тим самим принципом. Матриці $\vec{\psi}_0$ та $\vec{\psi}_1$ визначаються як

$$\vec{\psi}_0 = \vec{F}_0 \cdot \vec{F}_0^T; \quad (3)$$

$$\vec{\psi}_1 = \vec{F}_1 \cdot \vec{F}_1^T. \quad (4)$$

Для отримання величини спрогнозованої вторинної оцінки за обчисленням згідно з виразом (2)

вектором $\vec{\alpha}^*$ вагових коефіцієнтів слід доповнити матрицю \vec{F} стовпцем $\|F_{m,k+1}\|$ числових значень згладжених функцій, обчислених в часовій точці прогнозу t_{k+1} . Позначимо цей стовпець як окремий вектор \vec{F}_{K+1} . Тоді спрогнозована величина вторинної оцінки обчислюється як

$$\vec{\lambda}_{\text{пр}}^* = \vec{F}_{K+1}^T \vec{\alpha}^*. \quad (5)$$

Має практичну значущість питання, наскільки точною є ця величина.

Дисперсія спрогнозованої вторинної оцінки при довільній системі згладжених функцій

У роботі [21] показано, що за умови статистичної незалежності первинних оцінок коваріаційна матриця вторинних оцінок визначена виразом

$$\vec{K}_{\lambda^*} = \vec{F}^T \vec{K}_{\alpha} \vec{F}, \quad (6)$$

де \vec{K}_{α} є коваріаційною матрицею вектора (2) вагових коефіцієнтів і обчислюється як

$$\vec{K}_{\alpha} = \frac{1}{\sigma_0^2} \vec{\Phi}^{-1} \vec{F}_0 \vec{F}_0^T (\vec{\Phi}^{-1})^T + \frac{1}{\sigma_1^2} \vec{\Phi}^{-1} \vec{F}_1 \vec{F}_1^T (\vec{\Phi}^{-1})^T. \quad (7)$$

Тут

$$\vec{\Phi} = \frac{1}{\sigma_0^2} \vec{\psi}_0 + \frac{1}{\sigma_1^2} \vec{\psi}_1. \quad (8)$$

З урахуванням співвідношень (3), (4) та (8), а також симетричності кожної з матриць $\vec{\psi}_0$ та $\vec{\psi}_1$ вираз (7) для коваріаційної матриці вагових коефіцієнтів набуває більш компактного вигляду

$$\vec{K}_{\alpha} = \vec{\Phi}^{-1}, \quad (9)$$

звідки випливає, що

$$\vec{K}_{\lambda^*} = \vec{F}^T \vec{\Phi}^{-1} \vec{F}. \quad (10)$$

Діагональні елементи цієї матриці є дисперсіями відповідних членів λ_k^* послідовності вторинних оцінок. Дисперсію спрогнозованої вторинної оцінки визначаємо на базі виразу (5) як

$$D\left\{\lambda_{\text{пр}}^*\right\} = \vec{F}_{K+1}^T \cdot E\left\{\left(\vec{\alpha}^* - \vec{\alpha}\right)\left(\vec{\alpha}^* - \vec{\alpha}\right)^T\right\}_{K+1} \vec{F}_{K+1} = \vec{F}_{K+1}^T \cdot \vec{K}_{\alpha} \cdot \vec{F}_{K+1} = \vec{F}_{K+1}^T \cdot \vec{\Phi}^{-1} \cdot \vec{F}_{K+1}, \quad (11)$$

де α – істинний вектор вагових коефіцієнтів;

$E\{\dots\}$ – позначення операції обчислення математичного очікування.

Прогнозування при згладжуванні поліномом першого степеня

При поліноміальному згладжуванні використовують систему функцій F_{mk} , що задовольняють закон

$$F_{mk} = F_m(t_k) = \frac{1}{(m-1)!} t_k^{m-1}. \quad (12)$$

При згладжуванні поліномом першого степеня маємо систему, що складається з двох функцій

$$\left. \begin{aligned} F_{1k} &= 1, \\ F_{2k} &= t_k. \end{aligned} \right\} \quad (13)$$

У цій ситуації ваговий коефіцієнт α_1 має фізичний сенс постійної складової вимірюваного параметру, а ваговий коефіцієнт α_2 є постійною швидкістю зміни цього параметру в часі.

Позначимо числові величини моментів часу, які відносяться до множини K_0 , як θ_k , а числові величини моментів часу, які відносяться до множини K_1 , позначимо як τ_k . Введемо також такі позначення:

$$\left. \begin{aligned} \Theta &= \sum_{K_0} \theta_k, \\ \Gamma &= \sum_{K_1} \tau_k, \\ \Omega &= \sum_{K_0} \theta_k^2, \\ \text{H} &= \sum_{K_1} \tau_k^2. \end{aligned} \right\} \quad (14)$$

Нагадаємо, що кількість елементів множини K_0 дорівнює K_0 , а множини $K_1 - K_1$.

Урахування визначення (13) при розрахунку матриць $\vec{\Psi}_0$ та $\vec{\Psi}_1$ (вирази (3) та (4)) і подальше використання співвідношення (8) для розрахунку матриці $\vec{\Phi}$ призводить до такого вигляду цієї матриці

$$\vec{\Phi} = \begin{pmatrix} \frac{K_0}{\sigma_0^2} + \frac{K_1}{\sigma_1^2} & \frac{\Theta}{\sigma_0^2} + \frac{\Gamma}{\sigma_1^2} \\ \frac{\Theta}{\sigma_0^2} + \frac{\Gamma}{\sigma_1^2} & \frac{\Omega}{\sigma_0^2} + \frac{\text{H}}{\sigma_1^2} \end{pmatrix}. \quad (15)$$

Для обчислення дисперсії спрогнозованої вторинної оцінки згідно з формулою (11) необхідно знайти вирази для елементів матриці $\vec{\Phi}^{-1}$.

Позначивши ці елементи як Φ_{ij}^{-1} та виходячи із запису (15) після низки перетворень отримуємо, що

$$\Phi_{11}^{-1} = \frac{\sigma_0^2 \cdot \sigma_1^2}{K_0 \sigma_1^2 + K_1 \sigma_0^2 - \frac{(\Theta \sigma_1^2 + \Gamma \sigma_0^2)^2}{\Omega \sigma_1^2 + \text{H} \sigma_0^2}}. \quad (16)$$

$$\Phi_{12}^{-1} = \Phi_{21}^{-1} = \frac{-\sigma_0^2 \cdot \sigma_1^2}{(K_0 \sigma_1^2 + K_1 \sigma_0^2) \frac{\Omega \sigma_1^2 + \text{H} \sigma_0^2}{\Theta \sigma_1^2 + \Gamma \sigma_0^2} - (\Theta \sigma_1^2 + \Gamma \sigma_0^2)}. \quad (17)$$

$$\Phi_{22}^{-1} = \frac{\sigma_0^2 \cdot \sigma_1^2}{\Omega \sigma_1^2 + \text{H} \sigma_0^2 - \frac{(\Theta \sigma_1^2 + \Gamma \sigma_0^2)^2}{K_0 \sigma_1^2 + K_1 \sigma_0^2}}. \quad (18)$$

Формули (16)-(18) для розрахунку елементів зворотної матриці при довільних величинах K_0, K_1 ,

σ_0^2, σ_1^2 та довільних моментах часу θ_k і τ_k не надають можливості для подальшого спрощення і є кінцевим виразом для елементів матриці $\vec{\Phi}^{-1}$, якими й належить користуватися при розрахунку дисперсії за формулою (11).

Якщо ж первинні оцінки розташовані в часі з однаковими інтервалами величиною Δt кожен, $\theta_k = k\Delta t$, де $k \in K_0$, а $\tau_k = k\Delta t$, $k \in K_1$. За таких обставин формули (16)-(18) перетворюються на такі:

$$\Phi_{11}^{-1} = \frac{\sigma_0^2 \cdot \sigma_1^2}{K_0\sigma_1^2 + K_1\sigma_0^2 - \left(\frac{\sigma_1^2 \sum_{K_0} k + \sigma_0^2 \sum_{K_1} k}{\sigma_1^2 \sum_{K_0} k + \sigma_0^2 \sum_{K_1} k} \right)^2}, \quad (19)$$

$$\Phi_{12}^{-1} = \Phi_{21}^{-1} = \frac{-\sigma_0^2 \cdot \sigma_1^2}{\Delta t \left[(K_0\sigma_1^2 + K_1\sigma_0^2) \frac{\sigma_1^2 \sum_{K_0} k^2 + \sigma_0^2 \sum_{K_1} k^2}{\sigma_1^2 \sum_{K_0} k + \sigma_0^2 \sum_{K_1} k} - \left(\frac{\sigma_1^2 \sum_{K_0} k + \sigma_0^2 \sum_{K_1} k}{\sigma_1^2 \sum_{K_0} k + \sigma_0^2 \sum_{K_1} k} \right)^2 \right]}, \quad (20)$$

$$\Phi_{22}^{-1} = \frac{\sigma_0^2 \cdot \sigma_1^2}{(\Delta t)^2 \left[\sum_{K_0} k^2 + \sum_{K_1} k^2 - \frac{\left(\frac{\sigma_1^2 \sum_{K_0} k + \sigma_0^2 \sum_{K_1} k}{K_0\sigma_1^2 + K_1\sigma_0^2} \right)^2}{K_0\sigma_1^2 + K_1\sigma_0^2} \right]}. \quad (21)$$

Формули (19)-(21) є кінцевими виразами для елементів матриці $\vec{\Phi}^{-1}$ в ситуації рівномірно розташованих в часі первинних оцінок.

Для прикладу розглянемо окремий випадок, коли $\sigma_0 = \sigma_1 = \sigma$ і $K_0 + K_1 = K \gg 1$.

Ураховавши, що $\sum_{k=1}^K k = \frac{K}{2}(K+1)$ та

$$\sum_{k=1}^K k^2 = \frac{K}{6}(K+1)(2K+1), \quad \text{отримаємо з}$$

останніх трьох формул

$$\left. \begin{aligned} \Phi_{11}^{-1} &\approx \frac{4\sigma^2}{K}, \quad \Phi_{12}^{-1} = \Phi_{21}^{-1} \approx -\frac{\sigma^2}{\Delta t} \cdot \frac{6}{K^2}, \\ \Phi_{22}^{-1} &\approx \frac{12\sigma^2}{(\Delta t)^2 K^3}. \end{aligned} \right\} \quad (22)$$

Підстановка цих співвідношень до формули (11), за якою обчислюється дисперсія величини спрогнозованого параметра при поліноміальному згладжуванні дає

$$\begin{aligned} \sigma_{\text{пр}}^2 &= D \left\{ \lambda_{\text{пр}}^* \right\} \approx (1 - t_{K+1}) \cdot \begin{pmatrix} \frac{4\sigma^2}{K} & -\frac{6\sigma^2}{\Delta t \cdot K^2} \\ -\frac{6\sigma^2}{\Delta t \cdot K^2} & \frac{12\sigma^2}{(\Delta t)^2 \cdot K^3} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} 1 \\ t_{K+1} \end{pmatrix} = \\ &= \frac{4\sigma^2}{K} \left[1 - 3 \frac{t_{K+1}}{T} + 3 \left(\frac{t_{K+1}}{T} \right)^2 \right], \quad (23) \end{aligned}$$

де $T = K \cdot \Delta t$ – протяжність інтервалу спостереження при формуванні послідовності первинних оцінок. Незавжди побачити, що величина $\sigma_{\text{пр}}^2$ сягне мінімального значення σ^2/K при $t_{K+1} = T/2$.

На рис. 1 наведено графіки залежностей дисперсії спрогнозованої вторинної оцінки від часової дистанції прогнозу t_{K+1} при $\sigma_0^2 = 0,3$;

$\sigma_1^2 = 4,8$; $K_0=K_1=5$. Крива 1 відповідає множині $K_0=\{1,2,3,4,5\}$, крива 2 – множині $K_0=\{1,3,4,5,9\}$, крива 3 – множині $K_0=\{2,6,7,8,10\}$, крива 4 – множині $K_0=\{6,7,8,9,10\}$.

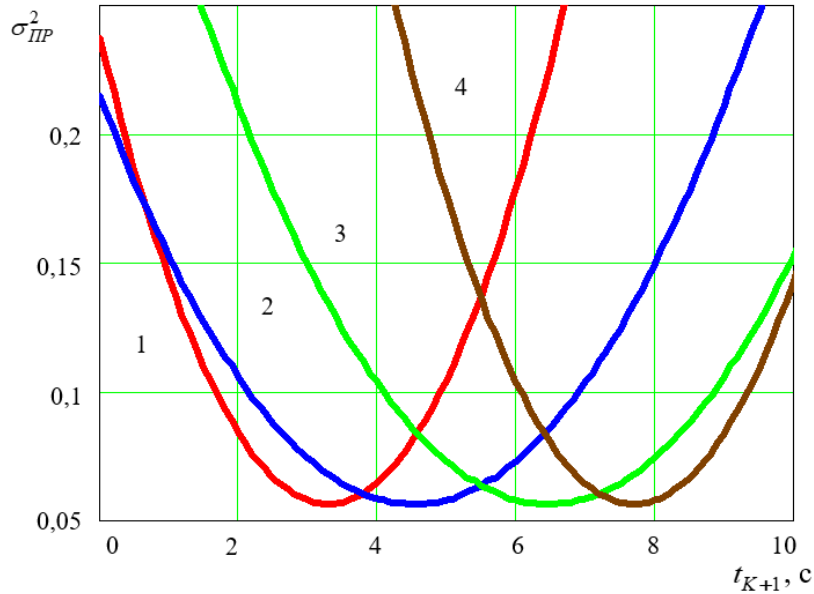


Рис. 1. Залежність дисперсії прогнозу від часової дистанції прогнозування при різному групуванні низькодисперсних та високодисперсних первинних оцінок

Можна зробити досить обґрунтоване припущення, що із пересуванням більшості низькодисперсних первинних оцінок від початку інтервалу спостереження до його кінця часова дистанція найточнішого прогнозу (точка мінімуму кривої) збільшується.

На рис. 2 зображено для порівняння графіки залежностей дисперсії прогнозу від часової дистанції прогнозу t_{K+1} при $\sigma_1^2 = \sigma_2^2 = 0,3$; $K=10$; $\Delta t=1$ с. Крива 1 відповідає точному розрахунку за формулами (11), (19)-(21), а крива 2 відповідає розрахунку за наближеною формулою (23).

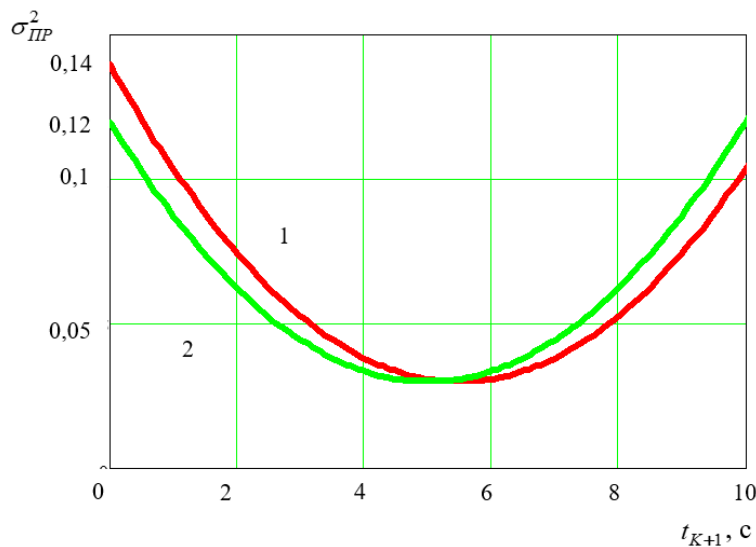


Рис. 2. Порівняння результатів обчислення дисперсії прогнозу за точною та наближеною формулами

Виглядає обґрунтованим припущення, що реальна часова дистанція найточнішого прогнозу, яку визначає крива 2, дещо більша за величину $T/2$, визначеною за кривою 1.

Розглянуте питання відноситься до сукупності методів прогнозування вторинних оцінок контрольованих параметрів сигналів у пристроях діагностики обладнання електроприводу та електропостачання. У цій роботі описано та обґрунтовано математичну процедуру розрахунку прогнозованої величини вторинної оцінки для будь-

Висновки

ІНФОРМАЦІЙНО-КЕРУЮЧІ СИСТЕМИ НА ЗАЛІЗНИЧНОМУ ТРАНСПОРТІ

якої часової дистанції прогнозу. При цьому на первинні оцінки, використані для розрахунку вагових коефіцієнтів згладжених функцій не накладено умов рівності дисперсій та еквідистантності в часі. Результати роботи дають змогу отримувати об'єктивну інформацію щодо прогнозованого технічного стану та передбачуваної необхідності технічного обслуговування контрольованого обладнання. Задачею майбутніх досліджень є вивчення впливу нестационарності вагових коефіцієнтів згладжених функцій на точність прогнозу.

Список використаних джерел

1. Теорія електричних і магнітних кіл / С. В. Панченко, О. М. Ананьєва, М. М. Бабаєв та ін. Харків: УкрДУЗТ, 2020. 247 с. <https://lib.kart.edu.ua/handle/123456789/5408>.
2. Jameson N. J., Azarian M. H., Pecht M. Impedance-Based Condition Monitoring for Insulation Systems Used in Low-Voltage Electromagnetic Coils. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*. 2017. Vol. 64. No 5. P. 3748-3757. DOI: 10.1109/TIE.2017.2652359.
3. Bui M. H., Dutta R., Rahman F. Application of Deep Learning in Parameter Estimation of Permanent Magnet Synchronous Machines. *IEEE Access*. 2024. Vol. 12. P. 40711-40721. DOI: 10.1109/ACCESS.2024.3377224.
4. 112 IEEE Standard Test Procedure for Polyphase Induction Motors and Generators // [law.resource.org/pub/us/cfr/ibr/004/ieee.112.2004.pdf](http://www.law.resource.org/pub/us/cfr/ibr/004/ieee.112.2004.pdf).
5. Estimation of temperature dependent equivalent circuit parameters for traction-based electric machines / O. Agbaje, D.F. Kavanagh, M. Sumislawska et al. *IET Conference Publications* 2013 (621). P. 1-7. <https://dx.doi.org/10.1049/cp.2013.1898>.
6. Spasic Z. T., Radic M. M., Dimitrijevic D. G. Temperature rise in induction motor windings as the case of variation in rotational speed of an axial fan. *Thermal Science*. 2016. Vol. 20. Suppl. 5. Pp. S1449-S1459. DOI: 10.2298/TSCI16S5449S.
7. Novel technique for precise derating torque of induction motors using ANFIS / A. A. Shaier, A. Flah, H. Kraiem et al. *Scientific Reports*. (2025). 15:8550. <http://doi.org/10.1038/s41598-025-92821-z>.
8. Wu H., Gao H. Induction-motor stator and rotor winding temperature estimation using signal injection method. *IEEE Transactions on Industry Applications*. August 2006. Vol. 42. No 4. P. 1038-1044. DOI: 10.1109/TIA.2006.876081.
9. Magnetic Effects of DC Signal Injection on Induction Motors for Thermal Evaluation of Stator Windings / P. Zhang, Y. Du, T.G. Habetler, B. Iu. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*. 58(5): 1479-1489. DOI: 10.1109/TIE.2010.2089935.
10. Optimization of HF signal injection parameters for EV applications based on sensorless IPMSM drives / L. Idkhajine, E. Monmasson, Z. Makni, P.-A. Chauvenet, B. Condamin, A. Bruyere. *IET Electric Power Applications*. Vol. 12, Issue 3. P. 347-356. URL : <https://doi.org/10.1049/iet-epa.2017.0228>.
11. Signal injection method without torque ripple for stator winding temperature estimation of surface-mounted PMSM drive systems / J. Fang, S. Ding, Y. Sun, J. Hang. *Journal of Power Electronics*. November 2020. 20(6): 1504-1513. DOI:1007/s43236-020-00153-0.
12. A Study of Frequency Domain Reflectometry Technique for High-Voltage Rotating Machine Winding Condition Assessment / J. Cheng, Y. Zhang, H. Yun, L. Wang, N. Taylor. *Machines*. 2023. 11 (9), 883. DOI: <https://doi.org/10.3390/machines11090883>.
13. Bouassi Y., Rezig A., Touati S. Prognosis of insulation deterioration in induction motors winding subject to voltage fluctuations. *Przeglad Elektrotechniczny*, ISSN 0033-2097, R 100, NR 1/2024. P. 58-62. DOI: 10.15199/48.2024.01.12.
14. Величко О., Гордієнко Т. Оцінка довготривалого дрейфу еталонів індуктивності. *Український метрологічний журнал*. 2024. № 1. С. 23-30. DOI: <https://doi.org/10.24027/2306-7039.1.2024.300926>.
15. Kendall M.G., Ord J.K. *Time Series*. New York: Oxford University Press, 1990. 312 p. DOI: <https://document.pub/time-series.html>.
16. Strelkovskaya I, Solovskaya I., Makoganiuk A. Different extrapolation methods in problems of forecasting. *Advances in Information and Communication Technology and Systems* (Lecture Notes in Networks and Systems). Springer, 2020. Vol. 152. P. 217-228. DOI: <https://doi.org/10.1007/978-3-030-58359-0>.
17. Patil S.S., Patil S. Pawar A.M. Study of Various Forecasting Models for Time Series Data Using Stochastic Processes. *Journal of Computer Technology Applications*. Vol. 12. Issue 2. 2021. P. 26-32. DOI: 10.37591/JoCTA,10.52711/2321-581X.2021.00018.
18. Li W., Eddie Law K.L. Deep Learning Models for Time Series Forecasting: A Review. *IEEE Access*. 2024. Vol. 12. P. 92306-92327. DOI: 10.1109/ACCESS.2024.3422528.
19. Pucheta J., Salas C., Herrera M. Rivero C.R., Alasino G. Short and Long-Term Time Series Forecasting Stochastic Analysis for Slow Dynamic Processes. *Applied Mathematics*. August 2019. Vol 10. No 8. DOI: 10.4236/am.2019.108050.
20. Osborne J.W. Improving your data transformations: Applying the Box-Cox transformation. *Practical Assessment, Research & Evaluation*. October 2010. Vol 15. No 12. P. 1-9.

- DOI: <https://www.researchgate.net/publication/284261483>.
21. Згладжування часової послідовності оцінок параметрів сигналу тестування обмотки статора трифазного асинхронного двигуна / О. М. Ананьєва, М. М. Бабасєв, М. Г. Давиденко, В. В. Панченко. *Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті*. 2025. № 2(30). С. 38-44. DOI: 10.18664/iksz.v30i2.335372.
 22. Синтез пристрою оцінювання параметрів синусоїдного сигналу, адитивно змішаного з одиночною імпульсною завадою / О. М. Ананьєва, М. М. Бабасєв, М. Г. Давиденко, В. В. Панченко. *Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті*. 2024. № 3(29). С. 38-44. DOI: 10.18664/iksz.v29i3.313625.
- References
1. **Panchenko, S. V., Ananieva, O. M., Babaiev, M. M., & et al. (2020).** *Teoriia elektrychnykh i mahnitnykh kil* [Theory of electrical and magnetic circuits]. Ukrainskyi derzhavnyi universytet zaliznychnoho transportu. <https://lib.kart.edu.ua/handle/12345678/9/5408>
 2. **Jameson, N. J., Azarian, M. H., & Pecht, M. (2017).** Impedance-based condition monitoring for insulation systems used in low-voltage electromagnetic coils. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 64(5), 3748–3757. <https://doi.org/10.1109/TIE.2017.2652359>
 3. **Bui, M. H., Dutta, R., & Rahman, F. (2024).** Application of deep learning in parameter estimation of permanent magnet synchronous machines. *IEEE Access*, 12, 40711–40721. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2024.3377224>
 4. **IEEE. (2004).** *IEEE standard test procedure for polyphase induction motors and generators* (IEEE Std 112-2004). <https://law.resource.org/pub/us/cfr/ibr/004/ieee.112.2004.pdf>
 5. **Agbaje, O., Kavanagh, D. F., Sumislawska, M., & et al. (2013).** Estimation of temperature dependent equivalent circuit parameters for traction-based electric machines. *IET Conference Publications*, 2013(621), 1–7. <https://doi.org/10.1049/cp.2013.1898>
 6. **Spasic, Z. T., Radic, M. M., & Dimitrijevic, D. G. (2016).** Temperature rise in induction motor windings as the case of variation in rotational speed of an axial fan. *Thermal Science*, 20(Suppl. 5), S1449–S1459. <https://doi.org/10.2298/TSCI16S5449S>
 7. **Shaier, A. A., Flah, A., Kraiem, H., & et al. (2025).** Novel technique for precise derating torque of induction motors using ANFIS. *Scientific Reports*, 15, Article 8550. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-92821-z>
 8. **Wu, H., & Gao, H. (2006).** Induction-motor stator and rotor winding temperature estimation using signal injection method. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 42(4), 1038–1044. <https://doi.org/10.1109/TIA.2006.876081>
 9. **Zhang, P., Du, Y., Habetler, T. G., & Lu, B. (2011).** Magnetic effects of DC signal injection on induction motors for thermal evaluation of stator windings. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 58(5), 1479–1489. <https://doi.org/10.1109/TIE.2010.2089935>
 10. **Idkhajine, L., Monmasson, E., Makni, Z., Chauvenet, P.-A., Condamine, B., & Bruyere, A. (2018).** Optimization of HF signal injection parameters for EV applications based on sensorless IPMSM drives. *IET Electric Power Applications*, 12(3), 347–356. <https://doi.org/10.1049/iet-epa.2017.0228>
 11. **Fang, J., Ding, S., Sun, Y., & Hang, J. (2020).** Signal injection method without torque ripple for stator winding temperature estimation of surface-mounted PMSM drive systems. *Journal of Power Electronics*, 20(6), 1504–1513. <https://doi.org/10.1007/s43236-020-00153-0>
 12. **Cheng, J., Zhang, Y., Yun, H., Wang, L., & Taylor, N. (2023).** A study of frequency domain reflectometry technique for high-voltage rotating machine winding condition assessment. *Machines*, 11(9), Article 883. <https://doi.org/10.3390/machines11090883>
 13. **Bouassi, Y., Rezig, A., & Touati, S. (2024).** Prognosis of insulation deterioration in induction motors winding subject to voltage fluctuations. *Przegląd Elektrotechniczny*, 100(1), 58–62. <https://doi.org/10.15199/48.2024.01.12>
 14. **Velychko, O., & Hordiienko, T. (2024).** Otsinka dovhotryvaloho dreifu etaloniv induktyvnosti [Estimation of long-term drift of inductance standards]. *Ukrainskyi metrolohichnyi zhurnal*, (1), 23–30. <https://doi.org/10.24027/2306-7039.1.2024.300926>
 15. **Kendall, M. G., & Ord, J. K. (1990).** *Time series*. Oxford University Press. <https://document.pub/time-series.html>
 16. **Strelkovskaya, I., Solovskaya, I., & Makoganiuk, A. (2020).** Different extrapolation methods in problems of forecasting. In *Advances in Information and Communication Technology and Systems* (Lecture Notes in Networks and Systems, Vol. 152, pp. 217–228). Springer. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-58359-0>
 17. **Patil, S. S., Patil, S., & Pawar, A. M. (2021).** Study of various forecasting models for time series data using stochastic processes. *Journal of Computer Technology & Applications*, 12(2), 26–32. <https://doi.org/10.37591/jocta.v12i2.5312>

18. Li, W., & Eddie Law, K. L. (2024). Deep learning models for time series forecasting: A review. *IEEE Access*, 12, 92306–92327. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2024.3422528>
19. Pucheta, J., Salas, C., Herrera, M., Rivero, C. R., & Alasino, G. (2019). Short and long-term time series forecasting stochastic analysis for slow dynamic processes. *Applied Mathematics*, 10(8), 643–674. <https://doi.org/10.4236/am.2019.108050>
20. Osborne, J. W. (2010). Improving your data transformations: Applying the Box-Cox transformation. *Practical Assessment, Research and Evaluation*, 15, Article 12. <https://www.researchgate.net/publication/284261483>
21. Ananieva, O. M., Babaiev, M. M., Davydenko, M. H., & Panchenko, V. V. (2025). Zhladzhuвання chasovoi poslidovnosti otsinok parametriv syhnalu testuvannya obmotky statora tryfaznoho asynkhronnoho dvyhuna [Smoothing of the time sequence of parameter estimations of the stator winding testing signal of a three-phase induction motor]. *Informatsiino-Keruiuchi Systemy na Zaliznychnomu Transporti*, (2), 38–44. <https://doi.org/10.18664/ikszt.v30i2.335372>
22. Ananieva, O. M., Babaiev, M. M., Davydenko, M. H., & Panchenko, V. V. (2024). Syntez prystroiu otsiniuvannya parametriv synusoidnoho syhnalu, adytyvno zmishanoho z odynochnoiu impulsnoiu zavadoiu [Synthesis of a device for estimating parameters of a sinusoidal signal additively mixed with a single impulse noise]. *Informatsiino-Keruiuchi Systemy na Zaliznychnomu Transporti*, (3), 38–44. <https://doi.org/10.18664/ikszt.v29i3.313625>

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

Prediction of secondary estimates of signal parameters for testing the stator windings of a three-phase induction motor

Abstract. Forecasting the technical condition of a three-phase asynchronous electric motor is the foundation of a cost-effective maintenance strategy for both the motor itself and the it is incorporated into. The stator winding of such a motor is one of the most unreliable elements of its design. The values of its active and reactive resistances are the main indicators of its technical condition.

A known method of measuring these quantities during normal operation of the motor is to introduce a small sinusoidal test voltage with all known parameters into it and then measure the amplitude and initial phase of the current in the winding caused by this voltage. The results of direct measurements of the specified current

parameters (primary estimates) are distorted by the additive effect of stationary Gaussian noise and short-term impulse interference.

This results in two different dispersion values of the primary estimates. To reduce the influence of high-variance estimates, smoothing of their time sequence is performed. As a result, a time sequence of secondary estimates is obtained, which has a smooth character. Due to this property, the sequence can be used to predict the numerical value of the monitored parameter at a specific time horizon.

The paper examines the transformation of the existing smoothing procedure for primary estimates into a forecasting procedure for secondary estimates. An analytical expression is derived for calculating the variance of the predicted value in the general case of smoothing by deterministic functions of time. This expression is specified for polynomial smoothing both for arbitrary time intervals between the obtained primary estimates and for time-equidistant primary estimates.

Computer simulation revealed that as the majority of low-variance primary estimates shift toward the end of the observation interval, the time horizon of the most accurate forecast increases. Therefore, a theoretically substantiated forecasting procedure has been developed for predicting the sequence of secondary estimates of the test current parameters of the stator winding of a three-phase asynchronous electric motor under conditions of non-uniform-accuracy primary measurement, as well as under conditions of possible non-equidistant arrangement of primary measurements in time.

Keywords: parameter estimation, primary estimation, secondary estimation, smoothing, prediction distance, variance.

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

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

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

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

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

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

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

Vladyslav Panchenko, Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Department of Electric Power Engineering, Electrical Engineering and Electromechanics, Ukrainian State University of Railway Transport, Kharkiv, Ukraine. E-mail:

Стаття надійшла 22.03.26

Стаття прийнята до друку після рецензування 14.04.26

Стаття опублікована (оприлюднена) 29.05.26

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

Research into methods and means of controlling brushless traction motors of locomotives based on modern power converters

Abstract. *The object of the study is the electromechanical and energy conversion processes occurring in brushless traction electric drives of locomotives during the implementation of traction and regenerative braking modes. The paper examines approaches aimed at improving the energy efficiency and operational reliability of traction systems through the justified selection of power converter topologies and modern methods of controlling the electromagnetic torque of traction motors.*

The structural and energy characteristics of induction motors and permanent magnet synchronous motors are generalized as the main control objects within brushless locomotive electric drive systems. It is established that the operation of traction systems under railway conditions is characterized by a wide speed range, significant load variations, and the requirement to ensure bidirectional energy exchange with the traction power supply system.

The main operating modes of the traction electric drive, particularly the traction mode and the electric braking mode, are systematized, and the structural requirements for their implementation are determined. Typical configurations of power conversion systems used in DC and AC electric locomotives are summarized, including solutions based on a DC link, voltage source inverters, multilevel converters, intermediate energy conversion stages, and hybrid configurations incorporating energy storage systems.

It is shown that the efficiency of regenerative braking and the stability of energy processes are largely determined by the capability for bidirectional energy conversion, the parameters of the DC link, and the coordination of the electric drive with the characteristics of the catenary traction power supply system. It is established that the application of modern vector control methods and direct torque regulation, and reduced energy losses in power converters.

The prospects of the considered approaches are associated with the integration of next-generation semiconductor power conversion systems, the application of energy storage devices, and adaptive control algorithms capable of operating under variable operating conditions. The results of this review study can be useful in the design and modernization of locomotive traction electric drive control systems, the optimization of regenerative braking modes, and ensuring reliable locomotive operation over a wide range of load conditions.

Keywords: *brushless traction motors, traction drive, locomotive, power converters, voltage source inverter, regenerative braking, control methods, multilevel inverters.*

Relevance of the research topic.

The relevance of research into methods for controlling brushless traction motors of locomotives is due to modern trends in the development of electric rolling stock, focused on increasing energy efficiency and reducing operating costs. Asynchronous motors and permanent magnet synchronous machines are increasingly being implemented in traction electric drives due to their high reliability, absence of a commutator-brush assembly, and improved dynamic characteristics. At the same time, their efficiency significantly depends on the use of modern power electronic converters, in particular voltage source inverters, active four-quadrant (4QS) converters, controlled rectifiers, as well as multilevel inverter structures, which provide improved output voltage quality and reduced harmonic distortion. The further development of semiconductor technologies, in particular the use of SiC devices and modular converter structures, opens new prospects for improving the efficiency and functional capabilities of traction drives.

© **NERUBATSKYI V. P. 2026**

The implementation of energy-saving modes, such as regenerative braking, becomes especially important, the effectiveness of which largely depends on the possibility of bidirectional energy exchange with the contact network and the integration of energy storage systems into the intermediate DC link. This allows for an increased utilization of regenerative energy and ensures the stability of energy processes in traction systems. In this context, the study of control methods and means for brushless motors based on modern power electronic converters represents an important direction for improving locomotive traction drives.

Introduction. The development of locomotive traction drives at the present stage is inseparably linked with the implementation of next-generation electric machines and high-efficiency power electronic devices. The transition from traditional commutator systems to brushless traction motors is driven by the desire to increase operational reliability, reduce maintenance requirements, and ensure stable energy characteristics across a wide range of operating modes. In this context,

asynchronous motors and permanent magnet synchronous machines are considered as the fundamental components of modern traction drives, meeting the demands of intensive railway operation.

Brushless traction motors are characterized by high specific power, the ability to operate under significant overloads, and the capability to achieve efficient electromechanical energy conversion under variable load conditions [1, 2]. Asynchronous motors remain a widely adopted solution due to their structural simplicity and resilience to external influences, whereas permanent magnet synchronous motors provide higher energy efficiency and improved power-to-size ratios. At the same time, the realization of the potential of such machines in traction applications is determined not only by their design but also by the capabilities of control systems and electrical energy conversion [3, 4].

One of the key components of a modern traction drive is the power converter, which provides voltage and frequency shaping according to the operating modes of the motor. Voltage source inverters serve as the basis for supplying asynchronous and synchronous machines with variable-frequency alternating current, enabling flexible control of electromagnetic torque and speed. The presence of an intermediate DC link allows for the stabilization of energy processes, smoothing of ripples, and the creation of conditions for efficient interaction between the contact network and the traction motors [5, 6].

A voltage source inverter is typically implemented based on transistor power modules (IGBTs or SiC MOSFETs) and provides pulse-width modulation of the output voltage, which is a necessary condition for the implementation of modern control methods for traction machines [7, 8]. The use of a voltage source inverter makes it possible to form the required electromagnetic operating modes of the motor, maintain optimal stator current values, and ensure high dynamic performance during locomotive acceleration and braking.

Depending on the type of locomotive power supply system, different topologies of input power conversion devices are used [9, 10]. For AC rolling stock, controlled thyristor rectifiers have historically been employed, providing regulation of the voltage in the intermediate DC link; however, they are associated with limitations in terms of regeneration capability and power

quality. Modern solutions are increasingly based on active four-quadrant converters, which enable bidirectional energy exchange with the grid, improve the power factor, and reduce harmonic distortion. Thus, the choice of power topology significantly affects the energy efficiency of the traction drive and the capability to implement regenerative braking.

An equally important aspect is the application of modern control methods that ensure precise torque control and optimization of energy processes. Field-oriented control (FOC) and direct torque control (DTC) methods have become widely adopted in traction systems due to their high dynamic response and ability to maintain optimal operating modes of the motor under rapidly varying load conditions [11, 12]. The effectiveness of such methods is determined both by the characteristics of the electrical machine and by the capabilities of the power converters supplying the traction motor.

Thus, a modern locomotive traction drive represents a complex electromechanical system in which the brushless traction motor, the voltage source inverter, and the input power conversion unit operate in close interaction. Achieving high energy efficiency, reliability, and the implementation of regenerative braking is determined both by the choice of power topology and by the application of effective torque and speed control methods.

Analysis of recent research and publications.

In the review paper [13], more than 240 publications (2019–2025) on advanced control of asynchronous motors are analyzed. Control methods – strategies, algorithms, and sensorless approaches (Fig. 1) – are summarized, with descriptions of their operating principles, advantages, limitations, and application areas. The comparison (Table 1) demonstrates the high efficiency of artificial intelligence-based direct torque control strategies, although their industrial implementation is limited by algorithmic complexity and hardware requirements. Prospects for hybrid approaches aimed at developing high-efficiency and reliable electric drive systems are also considered.

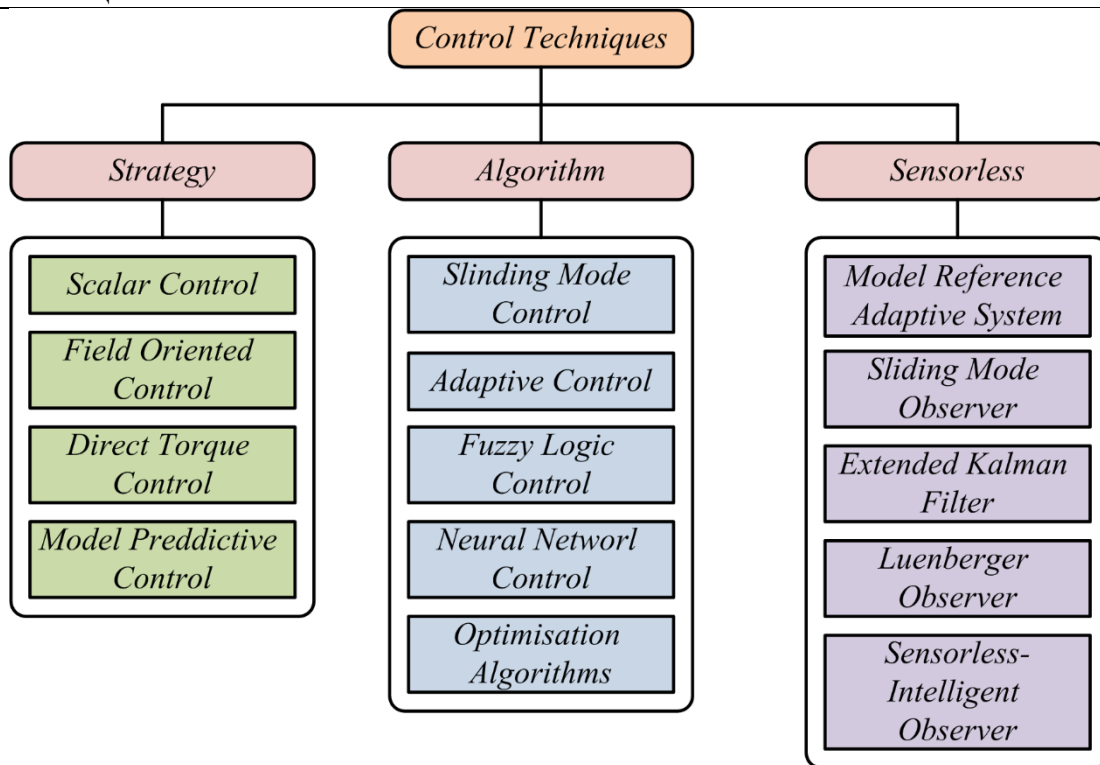


Fig. 1. Induction motor control techniques [13]

b
1

Comparative evaluation of induction motor control techniques [13]

Control technique	Advantages	Disadvantages
Scalar control	– simple and cost-effective structure	– limited precision; – sensitive to parameter variations; – no direct torque control; – poor performance at low speeds
FOC	– high precision; – excellent dynamic performance; – decoupled flux-torque control	– complex transformations; – sensitive to parameter variations
CDTC	– simple structure; – fast torque response; – robust against parameter variations	– significant torque and flux ripples; – variable switching frequency
DTC-SVM	– reduced torque ripple;	– complex implementation;

ІНФОРМАЦІЙНО-КЕРУЮЧІ СИСТЕМИ НА ЗАЛІЗНИЧНОМУ ТРАНСПОРТІ

	<ul style="list-style-type: none"> – fixed switching frequency; – low harmonic distortion 	<ul style="list-style-type: none"> – higher calculation charge
MPC-DTC	<ul style="list-style-type: none"> – significant ripple reduction; – improved dynamic response; – fast adaptation to disturbances 	<ul style="list-style-type: none"> – high computational demand (real-time prediction); – sensitive to motor model inaccuracies
DTC-SMC	<ul style="list-style-type: none"> – reduced torque and flux ripples; – robust to parameter variations and disturbances; – fast convergence in transients 	<ul style="list-style-type: none"> – chattering phenomenon; – sensitive to gain tuning
DTC-FL	<ul style="list-style-type: none"> – adaptive to load variations; – reduced torque and flux ripples; – enhanced robustness 	<ul style="list-style-type: none"> – complex design and implementation; – requires high-performance processors
DTC-ANN	<ul style="list-style-type: none"> – ripple reduction; – high accuracy; – improved robustness; – machine learning capability 	<ul style="list-style-type: none"> – requires large training datasets; – high algorithmic complexity; – demanding computational resources
FCS-MPC	<ul style="list-style-type: none"> – very high dynamic performance; – excellent control accuracy (torque, current); – low ripple; – fast response 	<ul style="list-style-type: none"> – high computational burden; – sensitive to parameter variations; – requires fast DSP units

In [14], a combined adaptive control system for an asynchronous motor is proposed, based on passivity principles and aimed at improving drive robustness in the presence of parametric uncertainties and external disturbances. The algorithm is synthesized using an energy-based approach with Lyapunov functions and adaptive parameter update laws, which ensure a reduction in control error during transient conditions. Experimental studies have confirmed improved dynamic performance and stability compared to conventional control methods. A limitation of the study is its focus on laboratory conditions and the lack of analysis of system operation within a high-power locomotive traction drive under real grid influences.

In [15], the improvement of the control algorithm for a 4QS converter of the DS3 electric locomotive with an asynchronous traction drive is investigated, aimed at increasing the converter efficiency and reducing current harmonic distortion. Simulation results have shown that

the modified algorithm reduces the discharge of the DC-link capacitor into the transformer secondary winding, thereby improving the energy performance of the drive. A limitation of the study is that the results are obtained for a single locomotive type and a specific load condition, and therefore require validation under a wider range of operating conditions.

In the article [16], a feedforward control method for a four-quadrant converter using a load current observer is considered, which allows improving the dynamic performance of the system under abrupt load changes. The integration of load current observation into the control algorithm is proposed, reducing the need for additional sensors. A comparison with conventional PI control is carried out: simulation and experimental results showed a reduction in voltage ripple and an accelerated system response. Such an approach is promising for high-power traction drives with stringent requirements for dynamic stability and power quality. A limitation of the study is that the proposed method is evaluated mainly on a model with a power of ~1.2 MW and requires further

ІНФОРМАЦІЙНО-КЕРУЮЧІ СИСТЕМИ НА ЗАЛІЗНИЧНОМУ ТРАНСПОРТІ

verification on real traction platforms with different grid and load parameters to confirm the universality and robustness of the approach.

In the scientific paper [17], a new grid-forming (GFM) control strategy for a four-quadrant converter in railway traction systems is proposed, adapted to the specific operating conditions of the contact network with a low short-circuit ratio (Fig. 2). Compared with standard schemes, the proposed approach significantly reduces

input inrush currents (up to 10 %) and accelerates the synchronization process of the 4QS with the grid. Such control is promising for modern traction drives with stringent requirements for stability and dynamic performance.

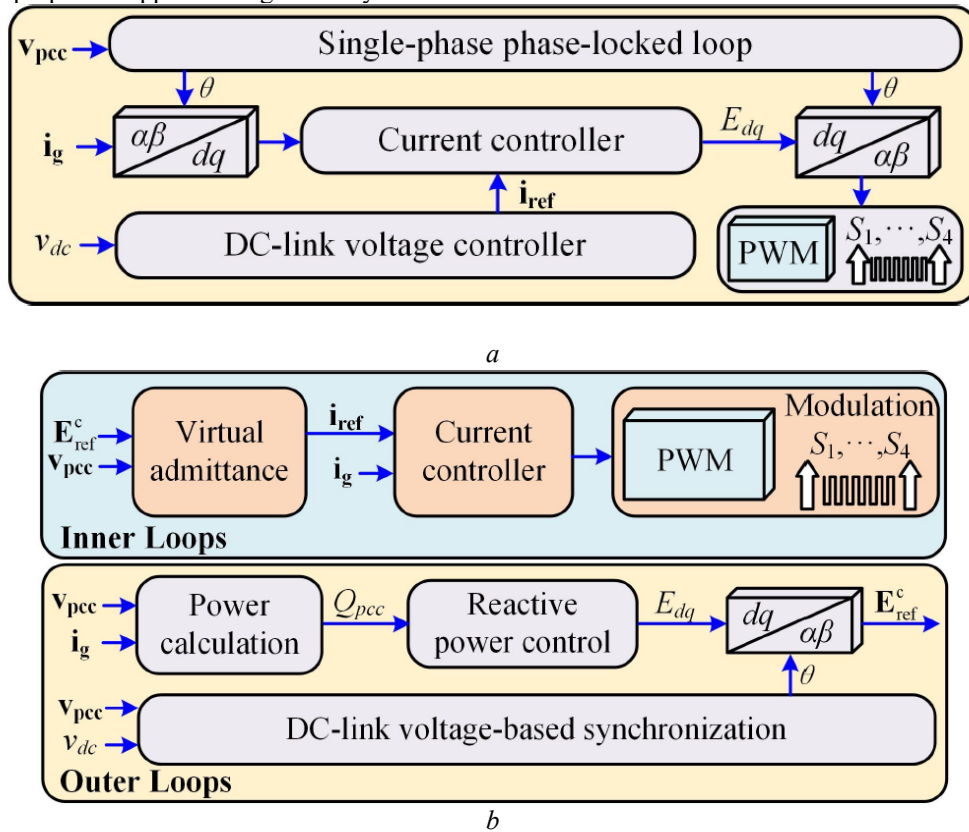


Fig. 2. Traction 4QSs with various control strategies [17]:
 a – the conventional GFL control strategy; b – the GFM control strategy

In the article [18], model predictive control of the torque of an asynchronous motor supplied through a voltage converter is investigated, with an emphasis on the impact of the algorithm on acoustic noise levels. It was found that predictive control (Fig. 3) allows the current harmonic spectrum to extend beyond the switching frequencies, contributing to a reduction in acoustic noise intensity compared to conventional methods. Experimental measurements confirmed the ability of the adapted control to reduce noise levels according to electric motor acoustics standards. A limitation of the study is that the test setup had low power, and the results may not fully reflect the behavior of high-power locomotive traction drives under complex operating conditions.

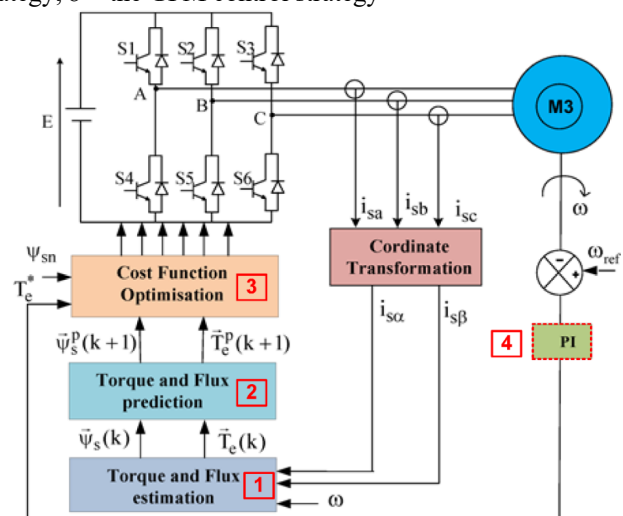


Fig. 3. The predictive torque control block diagram for an IM drive by a three-phase inverter [18]:

1 – estimation stage; 2 – prediction stage; 3 – optimization stage

The research materials [19–23] are devoted to the improvement of scalar control methods for asynchronous motors. These works examine the development of V/f control strategies, slip compensation, robust adaptation, and predictive algorithms for regulating speed and electromagnetic torque, aimed at increasing the accuracy of electromechanical energy conversion. The studies demonstrate the potential for enhancing the energy efficiency and stability of control systems for asynchronous drives under variable load conditions. At the same time, most results were obtained primarily through mathematical modeling or bench experiments, which indicates the need for further verification of the proposed approaches under real operating conditions of asynchronous drives.

In the scientific works [24–27], modern approaches to improving the energy efficiency of voltage source inverters, which are key components of control systems for brushless traction motors of locomotives, are comprehensively considered. The studies analyze the impact of various modulation algorithms on power losses and the quality of output electrical parameters. Particular attention is given to the use of impedance and quasi-impedance branches in the input circuit, which expand the functional capabilities of inverters and ensure improved energy conversion performance. These works form the scientific basis for further improvement of power converters in traction drives. A limitation of the cited publications is their focus primarily on individual operating modes of the inverters, without proper consideration of the real operating conditions of locomotive traction drives and the specifics of their operation within control systems for brushless motors.

The research materials [28–30] are devoted to the application of multilevel power converters in control systems for brushless traction drives. These works substantiate the feasibility of using multilevel inverters to improve output voltage quality, reduce current harmonic distortion, and decrease electromagnetic and acoustic ripples in traction machines. It is shown that increasing the number of conversion levels contributes to reducing the load on power semiconductor switches, improving energy efficiency, and enhancing the electromagnetic compatibility of the drive. Particular attention is given to combining multilevel topologies with robust and nonlinear control algorithms, which ensure stable operation of brushless motors across a wide range of speeds and loads. The summarized results indicate the prospects of integrating multilevel converters into the structure of modern locomotive traction drives.

The research publications [31–35] are devoted to a comprehensive analysis of control systems and energy-efficient topologies of four-quadrant converters for electric rolling stock. The works provide a detailed

consideration of control algorithms for compensating 4QS converters, as well as energy-efficient solutions for three-level active rectifiers, taking into account the optimization of the power factor. Significant attention is paid to the application of modern modulation methods, which ensure stable and efficient operation of four-quadrant converters under various operating conditions. Some publications summarize technological approaches to the integration of control systems for active rectifiers in traction electric rolling stock, including the maintenance of a constant switching frequency of power switches. Overall, the materials create a systematic understanding of ways to improve the energy efficiency and reliability of locomotive drives through a comprehensive combination of technical, algorithmic, and digital solutions in the control of four-quadrant converters.

Summarizing the results of the analysis of the cited literature, it can be stated that modern research is focused on improving the energy efficiency, reliability, and dynamic performance of brushless traction motors of locomotives through the enhancement of control methods and the optimization of power converter structures and topologies. These results provide a scientific basis for the systematization of motor design features, control schemes, and traction drives as a whole, allowing for a substantiated determination of promising directions for increasing the efficiency of traction systems under various operating conditions.

Defining the purpose and objectives of the research. The aim of the work is a comprehensive review study of the methods and means of controlling brushless traction motors of locomotives (asynchronous and permanent magnet synchronous) through the analysis of their energy characteristics, modern power converter topologies, and torque and speed control algorithms. This approach allows for a substantiated consideration of ways to improve energy efficiency, reliability, and the implementation of traction and regenerative braking modes under railway operating conditions. To achieve the stated aim, the following tasks were formulated:

- to summarize the design and energy characteristics of brushless traction motors (asynchronous and permanent magnet synchronous) as control objects under railway traction conditions;

- to systematize the main operating modes and control structures of brushless traction drives of locomotives in traction and regenerative braking modes;

- to analyze the main topologies of power converters (voltage source inverters, thyristor rectifiers, 4QS converters) and determine their influence on the implementation of traction and regenerative braking modes;

- to consider modern methods of vector and direct torque control (FOC, DTC) in traction drive

ІНФОРМАЦІЙНО-КЕРУЮЧІ СИСТЕМИ НА ЗАЛІЗНИЧНОМУ ТРАНСПОРТІ

systems and evaluate their effectiveness depending on the type of motor and converter;

– to identify promising directions for improving the energy efficiency and reliability of control systems for locomotive traction drives.

The main part of the research.

Design and energy characteristics of brushless traction motors as control objects under railway traction conditions. Brushless traction motors, which include asynchronous machines and permanent magnet synchronous motors, are considered in modern locomotives as the main components of the electromechanical system responsible for propulsion and energy regeneration. They operate under complex railway conditions: with high starting and nominal loads, frequent changes in speed and direction, and during interaction with the contact network and the locomotive braking systems. Therefore, their study as control objects requires a comprehensive analysis of design and energy characteristics that determine the dynamics, energy efficiency, and reliability of the traction drive.

Asynchronous motors are characterized by structural simplicity and robustness [36, 37], resistance to overloads [38, 39], and low maintenance requirements [40, 41]. They are widely used in locomotives due to their reliability and ability to operate under harsh conditions. The squirrel-cage rotor provides mechanical reliability, minimizing the risk of failure under shock loads and vibration. However, as a control object, the asynchronous motor has specific features [42, 43]:

- rotor slip – the motor torque depends on the stator frequency and current, which complicates precise torque control;
- parameter variation with heating – inductance and winding resistance change, requiring adaptive control algorithms;
- limited energy efficiency at low speeds – due to low rotational frequency and losses in the phase windings.

Therefore, the use of asynchronous motors in locomotives requires the application of voltage source inverters with pulse-width modulation and modern control methods (FOC or DTC), which allow compensating for dynamic parameter variations and maintaining optimal traction modes [44, 45].

Comparative characteristics of the asynchronous motor and the permanent magnet synchronous motor

Parameter	Asynchronous motor	Permanent magnet synchronous motor
Rotor design	Squirrel-cage rotor, without magnets	Rotor with high-flux permanent

Permanent magnet synchronous motors provide high specific power and better size-to-weight ratios compared to asynchronous motors [46, 47]. The absence of rotor currents reduces losses and increases system efficiency, which is especially important for locomotives under intensive operation. Permanent magnet synchronous motors enable high dynamic response and precise torque control, ensuring optimal traction and regenerative braking modes. However, these motors have specific limitations [48, 49]:

- requirement for accurate rotor position determination – FOC or DTC methods require sensors or position estimators;
- risk of permanent magnet demagnetization – under overloads and high temperatures, magnetic properties may change, necessitating operational mode control;
- complexity of operation in the field-weakening region – at high speeds, special stator current control is required to provide the full torque range.

In railway applications, brushless motors operate in two main energy modes: the traction mode, in which the motor consumes electrical energy from the contact network to produce traction torque, and the regenerative braking mode, in which the motor operates as a generator, returning energy to the network or storage devices. This defines the key requirements for power converters: bidirectional energy exchange, current and voltage stabilization, and smooth torque control [50, 51]. Only a coordinated combination of the motor, converter, and control algorithms allows achieving high efficiency and reliability of the locomotive.

Table 2 presents a comparative characterization of the asynchronous motor and the permanent magnet synchronous motor.

ІНФОРМАЦІЙНО-КЕРУЮЧІ СИСТЕМИ НА ЗАЛІЗНИЧНОМУ ТРАНСПОРТІ

		magnets
Maximum specific power (kW/kg)	0.7–1.0	1.2–1.5
Efficiency at rated operation (%)	88–92	94–97
Operating frequency/speed range	Wide, but with reduced torque at high speeds	Wide, with stable torque across the entire range
Increased starting losses	High due to rotor induction currents	Lower due to the absence of rotor currents
Need for position sensors	Not required, position control via vector method	Required for precise FOC/DTC
Torque control dynamics	Limited by slip inertia, slower response to command changes	High, fast response to command changes due to direct current control
Energy efficiency in regenerative braking mode	Medium, depends on slip and rotor resistance	High, nearly the entire torque can be fed back to the network
Reliability under harsh conditions	Very high, withstands overheating and mechanical loads	High, but requires monitoring of magnets and temperature
Effect of temperature on performance	Significant, resistance increase reduces torque	Lower, but magnets are sensitive to overheating
Maintenance requirements	Minimal, no brushes or commutators	Minimal, but the magnetic system requires periodic inspection

Thus, asynchronous and permanent magnet synchronous motors have distinct design and energy characteristics, which determine specific requirements for power converters and control methods. Their analysis is necessary for the development of optimal traction drive systems capable of providing high dynamic performance, efficiency, and operational reliability of locomotives under various operating modes.

Main operating modes and control structures of brushless traction drives of locomotives in traction and regenerative braking modes.

The operation of modern brushless traction drives of locomotives is determined by the specifics of railway service, which is characterized by significant load variations, a wide range of operating speeds, the need to perform intensive transient processes, and increased requirements for energy efficiency. Unlike stationary industrial installations, the traction drive operates under conditions of frequent mode changes, which necessitates flexible control means and the ability of the system to provide bidirectional energy exchange with the traction network [52, 53].

The main operating modes of the traction drive are traction, coasting, dynamic braking, and regenerative braking. For brushless electric machines, the traction mode involves the need to control the electromagnetic torque under variable supply frequency and voltage, which is achieved through the use of power

semiconductor converters [54, 55]. Effective implementation of regenerative braking in brushless traction drives of locomotives requires modern power converters capable of providing bidirectional energy exchange between the traction motors and the network. Key conditions include stabilization of the voltage in the intermediate DC link, coordination of the traction network parameters with the drive operating modes, and ensuring the stability of the control system. In cases where the traction network has limited capacity to accept regenerated energy, a combination of regenerative and rheostatic braking is used, which leads to a reduction in the energy efficiency of the traction drive system.

The structural organization of a brushless traction drive is determined by the type of locomotive power supply system (DC or AC) and the need to generate a controllable variable voltage to supply asynchronous and synchronous motors [56, 57].

For DC locomotives, a typical structure involves energy from the contact network passing through input filtering elements to the intermediate DC link, after which a voltage source inverter generates a three-phase AC system of the required frequency for the traction motor [58, 59]. Modern systems may include multilevel inverters, which reduce harmonic distortion and increase voltage quality, as well as DC-DC intermediate stages for voltage stabilization and integration of energy storage devices. This configuration allows the implementation of

ІНФОРМАЦІЙНО-КЕРУЮЧІ СИСТЕМИ НА ЗАЛІЗНИЧНОМУ ТРАНСПОРТІ

both traction and braking modes, provided that appropriate means for energy exchange are available.

For AC locomotives, the structural scheme includes a transformer stage to match the contact network voltage, followed by conversion of AC to DC to form the intermediate DC link. In traditional systems, controlled thyristor rectifiers were used for this purpose, providing voltage regulation but with limited and less efficient energy regeneration capabilities back to the network [60, 61]. Modern solutions involve the use of active four-quadrant converters [62–65], multilevel voltage source inverters [66–69], and may also include intermediate DC-DC stages [70–72] and energy storage devices (supercapacitors or lithium-ion batteries) [73–76], enabling efficient implementation of traction and regenerative braking modes, stabilization of the

intermediate link voltage, and improved overall energy efficiency of the locomotive. As an example, Fig. 4 shows the power structure of an AC locomotive traction drive based on an active four-quadrant rectifier and a voltage source inverter. The diagram includes the following notations: *TV* – transformer; *L*₁ – choke acting as a buffer reactor to increase the output voltage; *C*₁ – capacitor representing an energy storage capacitive filter for smoothing the output voltage (intermediate DC link); *C*₂*L*₂ – rejector filter used to filter 100 Hz harmonics in the output voltage; *S*₁–*S*₄ – power switches representing the fully controlled bridges of the 4QS rectifier; *S*₅–*S*₁₀ – power switches forming the voltage source inverter; *M* – asynchronous motor.

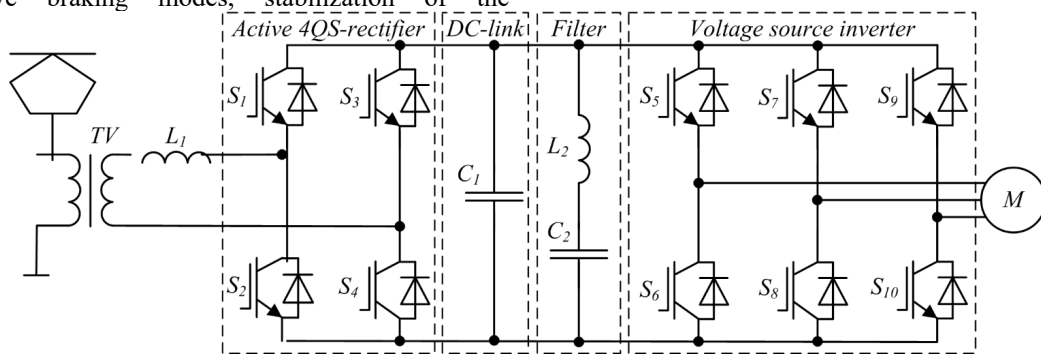


Fig. 4. Power structural scheme of an AC locomotive traction drive based on an active four-quadrant rectifier and a voltage source inverter [77–80]

A summary of the main structural configurations of brushless traction drives is presented in Table 3, showing both basic and modern enhanced architectures with multilevel inverters, intermediate DC-DC stages, and combined schemes with energy storage devices. This allows a clear illustration of the correspondence between the type of contact network, the configuration of power converters, and the capabilities for implementing traction and regenerative braking modes for both asynchronous and permanent magnet synchronous motors.

Typical structural schemes of brushless traction drives of locomotives with modern options

Type of traction network	Main structural elements	Type of traction motor	Regeneration implementation	Features (modern elements)
Direct current	Contact network → DC intermediate link → voltage source inverter → traction motor	Asynchronous or permanent magnet synchronous	Possible if the network can absorb energy	Use of multilevel inverter possible to reduce harmonics and increase voltage
Direct current	Contact network → DC-DC intermediate	Asynchronous or permanent magnet	Possible with connection of energy	The use of an intermediate DC-DC stage allows

ІНФОРМАЦІЙНО-КЕРУЮЧІ СИСТЕМИ НА ЗАЛІЗНИЧНОМУ ТРАНСПОРТІ

	stage → voltage source inverter → traction motor	synchronous	storage devices	adaptation of voltage for regenerative braking and stabilization of the supply voltage
Alternating current	Contact network → transformer → thyristor rectifier → intermediate link → voltage source inverter → traction motor	Asynchronous	Limited (often rheostatic braking)	Traditional scheme; in modernized systems, addition of a DC-DC stage for link stabilization is possible
Alternating current	Contact network → transformer → 4QS converter → intermediate link → voltage source inverter → traction motor	Asynchronous or permanent magnet synchronous	Full regeneration to the network	Possible use of multilevel inverters and energy storage devices (supercapacitors, lithium-ion batteries) to improve efficiency
Alternating current	Contact network → transformer → DC-DC intermediate stage → voltage source inverter → traction motor	Asynchronous or permanent magnet synchronous	Full regeneration + energy storage	Combined scheme with a DC-DC stage and energy storage devices ensures maximum energy efficiency and control flexibility

The operating modes of brushless traction drives of locomotives are determined by the combination of railway operational requirements and the structural capabilities of power conversion systems [81, 82]. The implementation of traction and regenerative braking modes directly depends on the type of contact network, the method of forming the DC intermediate link, and the applied energy conversion schemes [83, 84].

The introduction of multilevel inverters (Fig. 5) allows reducing harmonic distortions and provides more precise control of voltage and frequency at the motors, while the use of intermediate DC-DC cascades ensures voltage stabilization, adaptation to variations in the contact network voltage, and integration of energy storage systems.

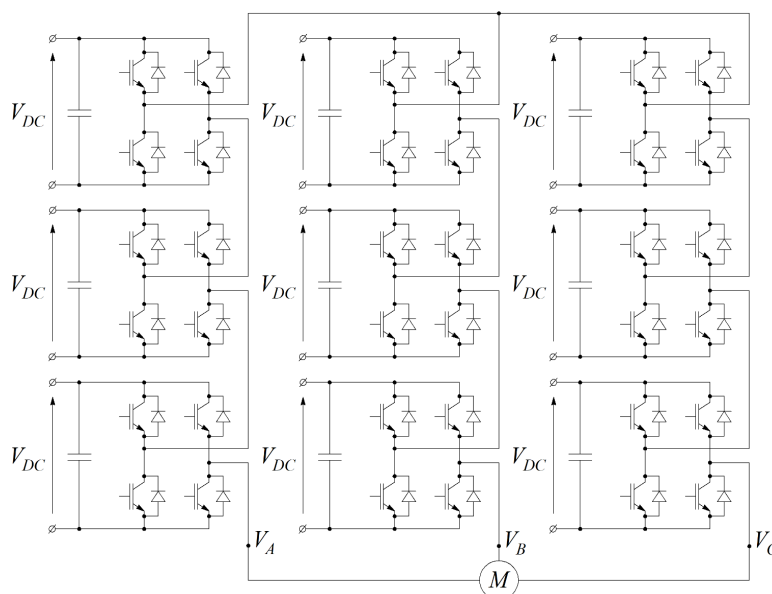


Fig. 5. Cascaded Multilevel Inverter Scheme [85]

ІНФОРМАЦІЙНО-КЕРУЮЧІ СИСТЕМИ НА ЗАЛІЗНИЧНОМУ ТРАНСПОРТІ

Combined schemes with energy storage devices (supercapacitors or lithium-ion batteries) enable full regenerative braking and improve the overall energy efficiency of electric locomotives, while providing backup power during voltage fluctuations in the contact network [86, 87].

All of this necessitates a detailed analysis of the main topologies of power converters, which ensure the efficient operation of modern traction drives and allow precise implementation of traction and regenerative braking modes for both asynchronous and permanent magnet synchronous motors.

Main topologies of power converters and their impact on the implementation of traction and regenerative braking modes. Modern brushless traction drives rely on the use of various power converters, which determine the capabilities for implementing traction and regenerative braking modes [88, 89]. Classical DC electric locomotives usually employ a voltage source inverter, which generates a controlled voltage for asynchronous or permanent magnet synchronous motors. In AC systems, the role of a controlled source is performed by a transformer in combination with a thyristor rectifier, an active 4QS converter, or modern cascaded multilevel voltage source inverters, which allow

the generation of a high-quality sinusoidal voltage with a low level of harmonics.

To increase flexibility and efficiency, some modern systems use DC-DC intermediate stages, which match the voltage levels between the power supply and the inverter, as well as combined schemes with integrated energy storage devices, enabling regenerative braking with energy storage for reuse [90, 91].

All these topologies determine the specific features of drive operation, torque control characteristics, and the capabilities of bidirectional energy flow. Table 4 presents the main converter topologies, motor compatibility, mode implementation, and key features of each configuration.

Main power converter topologies for electric locomotives

Type of traction network	Converter scheme	Type of traction motor	Mode implementation	Features
DC	Voltage source inverter	Asynchronous or permanent magnet synchronous	Traction and regenerative braking	Direct torque control, stable operation, enabling bidirectional energy flow
AC	Thyristor rectifier + voltage source inverter	Asynchronous or permanent magnet synchronous	Traction	Voltage control, reliable operation of classical schemes
AC	Active four-quadrant converter + voltage source inverter	Asynchronous or permanent magnet synchronous	Traction and regenerative braking	Operation in four quadrants, bidirectional energy flow, flexible torque control
AC/DC	Cascaded multilevel voltage source inverter + voltage source inverter	Asynchronous or permanent magnet synchronous	Traction and regenerative braking	High-quality voltage, low harmonic level, ability to provide high voltage to the motor
AC/DC	DC-DC intermediate stage + voltage source inverter	Asynchronous or permanent magnet synchronous	Traction and regenerative braking	Voltage matching, system flexibility, optimization of motor operating modes
AC/DC	Combined scheme with integrated energy storage + voltage source inverter	Asynchronous or permanent magnet synchronous	Traction and regenerative braking	Implementation of regenerative braking with energy storage, increased energy efficiency, provision of backup power

The choice of power converter topology determines the efficiency and dynamic characteristics of the electric drive. The voltage source inverter is a fundamental element in all considered configurations, providing controlled voltage and bidirectional energy flow. Thyristor rectifiers and four-quadrant converters determine the capabilities for controlling the electromagnetic torque and implementing regenerative braking in conventional traction drive schemes [92, 93], with four-quadrant converters providing a wider range and higher quality of control compared to thyristor rectifiers. Cascaded multilevel inverters and DC-DC intermediate stages improve the voltage spectral characteristics and enhance the controllability of the power system, while combined configurations with energy storage enable regenerative operation, optimize energy consumption, and can increase the locomotive's operational autonomy [94, 95].

Thus, the structural configuration of the power converter directly determines the capabilities for implementing traction and regenerative modes and is a key factor in the design of modern electric locomotives.

Modern vector control and direct torque control methods in traction drive systems, as well as the assessment of their effectiveness depending on the type of motor and converter. Contemporary brushless traction drives of locomotives, based on asynchronous motors and permanent-magnet synchronous machines, operate under complex conditions characterized by a wide range of speeds, significant load fluctuations, the need to implement traction and regenerative braking modes, as well as increased requirements for energy efficiency and dynamic stability [96–98].

Under such conditions, the key task of the control system is to ensure precise and fast regulation of the traction motor's electromagnetic torque, taking into account the limitations imposed by power semiconductor converters, the parameters of the contact network, and the operating modes of the DC link [99].

The use of voltage source inverters, active rectifiers, and multilevel energy conversion structures has created the prerequisites for implementing highly efficient torque control methods, among which the most common are vector control and direct torque control.

Vector control is one of the fundamental methods for designing AC traction drive systems. Its principle lies in transforming the three-phase current system into a two-component coordinate system aligned with the machine's magnetic flux vector [100]. This allows independent regulation of the components responsible for flux and torque generation, similar to the control of DC motors.

For asynchronous motors, the application of FOC ensures stable formation of the traction torque over a wide range of speeds, the possibility of operation in field-weakening at high speeds, and improvement of energy performance under variable loads [101]. For permanent magnet synchronous motors, vector control is practically the main method, as it allows achieving high torque accuracy and minimal losses in the stator windings [102]. At the same time, the implementation of FOC requires the presence of a rotor position estimation or measurement system, which is especially critical for traction modes with high torques and during regeneration [103, 104].

Direct torque control is an alternative approach in which torque and flux are regulated directly by selecting the optimal switching states of the inverter. The main advantage of DTC is its high dynamic response and the absence of the need for complex coordinate transformations in classical implementations [105]. For traction electric drives, the DTC method is characterized by features such as rapid response to load changes during acceleration and braking, increased robustness to variations in motor parameters, and the ability to operate effectively in regenerative braking mode [106, 107]. A drawback of traditional DTC is the increased level of torque ripples and the strict requirements for inverter voltage quality. Therefore, in modern systems, DTC is often combined with multilevel inverters or pulse-width modulation algorithms to reduce harmonic distortions [108].

The effectiveness of FOC and DTC methods in traction electric drives is largely determined by the structure of the power converter. The voltage source inverter is a fundamental element for generating controlled three-phase voltage for traction motors [109, 110]. Its characteristics, including switching frequency and the ability to operate in four quadrants, significantly influence the quality of torque control, torque ripple levels, and the stability of regenerative braking modes. Active four-quadrant converters used in traction systems provide controlled bidirectional energy exchange between the overhead contact line and the intermediate DC link, as well as high power quality, reduced harmonic distortions, and effective regulation of operating modes [111, 112]. Multilevel inverters contribute to improved output voltage quality, reduced torque ripples, and lower electromagnetic interference, which is especially important for high-power locomotive drives [113–115].

Table 5 presents a comparative assessment of FOC and DTC methods in traction electric drives, while Table 6 demonstrates that the choice of torque control method in locomotive traction drives is determined not only by the type of motor but also by the structure of the power converter and the capability to implement bidirectional energy exchange. Vector control is the fundamental solution for most electric locomotives,

ІНФОРМАЦІЙНО-КЕРУЮЧІ СИСТЕМИ НА ЗАЛІЗНИЧНОМУ ТРАНСПОРТІ

especially when using permanent magnet synchronous motors, whereas direct torque control is appropriate for high-dynamic modes when modern inverter structures are employed [116, 117].

Comparative assessment of FOC and DTC in traction electric drives

Parameter	FOC	DTC
Torque control accuracy	High	High, but with ripples
Dynamic response	High	Very high
Need for rotor position sensor	Often required	May be less critical
Torque ripples	Low	Increased
Regeneration capability	Effective	Effective, but filtering is more complex
Inverter requirements	Standard voltage source inverters	Preferably multilevel structures

T

a
b
l

Selection of the control method depending on the type of locomotive and the power converter

Type of locomotive and power supply system	Power converter structure	Type of traction motor	Recommended torque control method	Rationale for selection
DC locomotive (3 kV)	Contact network → intermediate DC link → voltage source inverter	Asynchronous	FOC	Provides precise torque control over a wide speed range and stable operation in traction and regenerative braking modes
DC locomotive with an active regenerative energy system	Intermediate DC link + active converter or energy storage → voltage source inverter	Asynchronous or permanent magnet synchronous	FOC or DTC (with pulse-width modulation)	The presence of an active energy channel increases the efficiency of regeneration, and DTC can be used for high-dynamic operating modes
AC locomotive (25 kV, 50 Hz) – traditional structure	Transformer → thyristor rectifier → intermediate DC link → voltage source inverter	Asynchronous	FOC (primarily)	The thyristor rectifier limits regenerative capabilities, so torque stability and minimization of current ripples are required
AC locomotive with an active rectifier	Transformer → 4QS converter → intermediate DC link	Asynchronous	FOC or DTC	The active rectifier provides bidirectional energy flow, enabling

ІНФОРМАЦІЙНО-КЕРУЮЧІ СИСТЕМИ НА ЗАЛІЗНИЧНОМУ ТРАНСПОРТІ

	→ voltage source inverter			efficient implementation of both traction and regenerative braking
AC locomotive with permanent magnet synchronous motors (high-efficiency drive)	Transformer → active rectifier → intermediate DC link → voltage source inverter	Permanent magnet synchronous	FOC (primary method)	For permanent magnet synchronous motors, precise control of currents and rotor position is critical; therefore, vector control is the most justified approach
Next-generation high-power locomotives	Intermediate DC link → multilevel inverter	Asynchronous or permanent magnet synchronous	FOC or DTC with optimized modulation	Multilevel inverters reduce harmonics and torque ripple, improving efficiency in both traction and braking modes
Electric locomotives with hybrid solutions	Intermediate DC link + DC-DC stage → voltage source inverter	Asynchronous or permanent magnet synchronous	FOC (primarily)	Voltage stabilization and energy storage capability make vector control optimal for smooth traction and regenerative braking modes

Thus, vector control and direct torque control are the most widely used modern methods for regulating torque in brushless traction drives of locomotives. Their application depends on the type of motor, dynamic performance requirements, regenerative operation conditions, and the structure of the power converter. FOC provides high torque accuracy and efficiency in steady-state operation, whereas DTC is characterized by enhanced dynamic response and robustness in transient processes, which is critical for traction and braking modes in railway transport.

Prospective directions for improving the energy efficiency and reliability of locomotive traction drive control systems. Improving the energy efficiency and operational reliability of traction drives is one of the key directions in the development of modern railway transport. Increasing demands for energy savings, reducing operational costs, and ensuring stable performance under intensive traction and braking conditions necessitate the enhancement of both the power components of the traction drive and the control algorithms for brushless traction motors [118, 119].

Prospective directions for the development of locomotive traction drive control systems are based on the integration of advanced power converters, the application of modern semiconductor technologies, the improvement of energy exchange with the overhead contact line, and the implementation of intelligent diagnostic methods and adaptive control [120].

One of the most promising directions is the implementation of power modules based on silicon carbide (SiC) [121]. Compared to conventional silicon IGBT devices, SiC components provide lower switching losses, the ability to operate at higher switching frequencies, and reduced size and weight of power converters [122–124]. For locomotive traction drives, this enables an increase in the overall efficiency of the energy conversion system, a reduction in thermal stress on power modules, improved output voltage quality of voltage source inverters, and a decrease in electromagnetic interference in the overhead contact line. Thus, the use of SiC converters is considered one of the most effective ways to modernize next-generation traction drives.

Further improvements in the energy efficiency and reliability of traction drives are associated with the use of multilevel inverters, which provide output voltage with lower harmonic distortion and reduced torque ripples. The advantages of multilevel structures in locomotive drives include reduced stress on the insulation of traction motors, improved electromagnetic compatibility with the traction network, smoother traction force, and the possibility of constructing modular systems with enhanced maintainability [125, 126]. The modular design principle of power converters also contributes to higher operational reliability through redundancy and simplified maintenance [127–129].

A significant potential for improving the energy efficiency of locomotives is associated with the integration of energy storage systems, in particular supercapacitors and lithium-ion batteries, into the

ІНФОРМАЦІЙНО-КЕРУЮЧІ СИСТЕМИ НА ЗАЛІЗНИЧНОМУ ТРАНСПОРТІ

intermediate direct current link. Such solutions enable enhanced efficiency of regenerative braking when the network's capacity to absorb energy is limited, reduce peak loads on the contact network during traction, provide partial autonomous power supply during short-term voltage drops, and optimize the energy operation modes of the traction drive under variable operating conditions. Combined systems with energy storage are considered an important component of prospective energy-saving technologies in railway traction [130, 131].

Improving the reliability of traction electric drives is impossible without the development of modern methods of technical condition monitoring and adaptive control [132, 133]. Changes in motor parameters, temperature effects, insulation aging, and load non-uniformity require the use of algorithms capable of correcting operating modes in real time. Promising directions are sensorless control with the use of state observers, prediction of failures of power modules based on diagnostic models, integration of digital monitoring systems and elements of artificial intelligence for optimization of traction and regenerative braking modes [134–137]. The development of such approaches will contribute to increasing operational safety and reducing maintenance costs of locomotives.

Thus, the considered promising directions for the development of traction electric drives of locomotives indicate a gradual transition from traditional control schemes to integrated energy-efficient systems of a new generation. Modern trends are determined by the active introduction of high-frequency power converters based on SiC technologies, the development of multilevel and modular inverter structures, as well as the use of energy storage to increase the efficiency of regenerative braking. At the same time, adaptive control algorithms and digital diagnostic methods are becoming of significant importance, which allow ensuring stable operation of the traction electric drive under conditions of variable loads and complex operating modes. Thus, the combination of innovations in power electronics and intelligent control approaches forms the basis for increasing the energy efficiency, reliability, and competitiveness of modern railway transport.

Conclusions.

Based on the research conducted, the following conclusions can be drawn:

- the design and energy characteristics of brushless traction motors of locomotives are generalized. It is established that asynchronous machines are characterized by high mechanical reliability and resistance to overloads; however, their electromechanical parameters depend on rotor slip and temperature changes of the windings, which requires an adaptive control approach. Permanent magnet synchronous motors provide increased energy efficiency and stable torque over a wide

speed range, but require accurate determination of rotor position and control of the state of the magnetic system under significant loads. The energy operating modes of these motors in traction systems are characterized by bidirectional flow of electrical energy in traction and regenerative braking modes, which determines the features of drive dynamics and torque control processes. Thus, asynchronous and permanent magnet synchronous motors have different design and energy characteristics, which justify the need to apply specialized control methods to ensure high efficiency, reliability, and dynamic performance in railway traction;

- the main structural configurations of brushless traction electric drives of electric locomotives are systematized and their operating modes are considered: traction and electric braking. It is established that in the schemes of direct current and alternating current electric locomotives the key elements are the intermediate direct current link and the voltage source inverter, which provides the formation of controlled voltage for asynchronous and permanent magnet synchronous motors. For alternating current systems a transformer with a thyristor rectifier or a transformer with an active four-quadrant converter are used. Modern systems also provide the use of multilevel inverters to improve the quality of the output voltage and reduce harmonic distortions. In addition, intermediate DC-DC stages are used for voltage stabilization and integration of energy storage, as well as combined schemes with electrical energy storage systems. The features of the use of asynchronous and permanent magnet synchronous motors in these schemes for the implementation of traction and braking modes are generalized. It is shown that the choice of structural configuration determines the possibilities of organizing bidirectional energy flow, provides increased control flexibility and stability of operation of the traction electric drive, and also allows the energy to be used as efficiently as possible during regenerative braking, which is critically important for modern electric locomotives;

- it is established that the configuration of power converters is a determining factor for the formation of traction and regenerative braking modes in brushless traction electric drives of locomotives. It is confirmed that the voltage source inverter provides effective torque control and bidirectional energy flow in direct current systems, while in alternating current systems the use of thyristor rectifiers, active 4QS converters, and cascaded multilevel inverters allows improving the quality of the supply voltage, implementing precise torque control and optimizing regeneration. The introduction of DC-DC intermediate stages and combined schemes with energy storage systems provides increased system flexibility, allows matching voltage levels, and enables efficient use of regenerated energy for repeated supply of the motors;

- modern approaches to electromagnetic torque control in brushless traction electric drives of locomotives based on asynchronous motors and permanent magnet

synchronous machines are considered and generalized. It is shown that the most widespread methods are vector control and direct torque control, which ensure the implementation of traction and regenerative braking modes over a wide range of speeds and loads. It is established that FOC is characterized by high control accuracy and efficiency in steady-state modes, while DTC provides increased speed of response and stability in transient processes. It is noted that the choice of control method is determined by the type of traction motor, the requirements for drive dynamics, and the structure of the power converter. The application of modern torque control algorithms in combination with voltage source inverters and active converters is a necessary condition for increasing the energy efficiency and reliability of traction electric drives of electric locomotives;

– it is determined that the prospects for increasing the energy efficiency and reliability of control systems of traction electric drives of locomotives are associated with the comprehensive improvement of power converters, the introduction of SiC semiconductor technologies, the development of multilevel inverter structures and modular solutions, as well as the integration of energy storage into the intermediate direct current link. An additional important direction is the implementation of control methods based on digital adaptive algorithms and diagnostic systems, which ensure stable operation of the electric drive under real operating conditions of railway traction.

Reference

1. Nerubatskyi V. P. Analysis of the operating conditions and modes of locomotive traction motors. *Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті*. 2025. Том 30, № 4. С. 3–21. <https://doi.org/10.18664/ikszt.v30i4.351425>.
2. Nerubatskyi V. P. Features of the use of brushless motors in traction rolling stock. *Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті*. 2026. Том 31, № 1.
3. Enache S., Enache M.-A., Vlad I. Considerations regarding the middle power asynchronous motors for railway electrical traction. *Energies*. 2024. Vol. 17, Iss. 17. 4327. <https://doi.org/10.3390/en17174327>.
4. 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.egyr.2022.10.411>.
5. 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>.
6. 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>.
7. Spejo L. B., Akor I., Rahimo M., Minamisawa R. A. Life-cycle energy demand comparison of medium voltage Silicon IGBT and Silicon Carbide MOSFET power semiconductor modules in railway traction applications. *Power Electronic Devices and Components*. 2023. Vol. 6. 100050. <https://doi.org/10.1016/j.pedc.2023.100050>.
8. Biel Z., Pčola M., Ondrejčka J., Franko M., Frivaldský M. Efficiency comparison of Si IGBT and SiC MOSFET based three-phase inverters. *Communications – Scientific Letters of the University of Zilina*. 2023. Vol. 25, Iss. 3. P. C56–C61. <https://doi.org/10.26552/com.C.2023.057>.
9. Rodrigues N., Cunha J., Monteiro V., Afonso J. L. Railway auxiliary power supply system: A modular multilevel converter approach. *Transportation Research Procedia*. 2023. Vol. 72. P. 3182–3189. <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2023.11.877>.
10. Iraklis A., Schirmer T., Dittus H., Lusiewicz A., Winter J. Overview of Three-Stage Power Converter Topologies for Medium Frequency-Based Railway Vehicle Traction Systems. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*. 2019. Vol. 68, Iss. 4. P. 3268–3278. <https://doi.org/10.1109/TVT.2019.2895500>.
11. 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>.
12. Anh A. T. H. T., Tung N. M. Speed control for traction motor of urban electrified train in field weakening region based on backstepping method. *Bulletin of Electrical Engineering and Informatics*. 2024. Vol. 13, No. 3. P. 1504–1512. <https://doi.org/10.11591/eei.v13i3.5209>.
13. 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>.
14. Travieso-Torres J. C., Ricaldi-Morales A. J., Aguila-Camacho N. Robust combined adaptive passivity-based control for induction motors. *Machines*. 2024. Vol. 12, Iss. 4. 272. <https://doi.org/10.3390/machines12040272>.

15. Dubravin Y., Tkachenko V., Morneva M. Improving the energy characteristics of a four-quadrant converter with pulse-width modulation. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2023. Vol. 3, No. 5 (123). P. 24–32. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2023.283271>.
16. Gao J., Chen Z., Dai L., Huang S., Xu W. Research on feedforward control of four-quadrant converter based on load current observer. *Energy Reports*. 2022. Vol. 8, Suppl. 5. P. 998–1008. <https://doi.org/10.1016/j.egy.2022.02.156>.
17. Li H., Jin Z., Zhao L., Ma C., Li S., Diao L., Wang X. Grid-forming four-quadrant converter for railway traction application: A proposal considering specific operational scenario in railway. *TechRxiv*. 2025. P. 1–10. <https://doi.org/10.36227/techrxiv.175735881.15879772/v1>.
18. Henda B., Khedher A. Predictive torque control for induction machine fed by voltage source inverter: Theoretical and experimental analysis on acoustic noise. *Acoustics*. 2025. Vol. 7, Iss. 4. P. 63. <https://doi.org/10.3390/acoustics7040063>.
19. Хворост М. В., Воронов Р. В. Дослідження систем скалярного керування тяговими асинхронними двигунами, що живляться від одного інвертора. *Комуніальне господарство міст*. 2020. Т. 1, Вип. 154. С. 33–40. <https://doi.org/10.33042/2522-1809-2020-1-154-33-40>.
20. Abouzeid A. F., 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. P. 700. <https://doi.org/10.3390/en13030700>.
21. Dinh B. H., Tran C. D. Improved scalar control based on slip compensation from virtual speeds in three-phase induction motor drives. *International Journal of Power Electronics and Drive Systems*. 2024. Vol. 15, No. 3. P. 1410–1416. <http://doi.org/10.11591/ijpeds.v15.i3.pp1410-1416>.
22. Lee K., Han Y. Reactive-power-based robust MTPA control for v/f scalar-controlled induction motor drives. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*. 2022. Vol. 69, Iss. 1. P. 169–178. <http://doi.org/10.1109/TIE.2021.3055183>.
23. Hasni A., El Fadil H., Lassioui A., El Asri Y., El Ancary M., Abbade H., Mouyane M. Enhancing scalar control of induction motors using super-twisting sliding mode control: Experimental validation. *Journal Européen des Systèmes Automatisés*. 2025. Vol. 58, No. 8. P. 1767–1776. <https://doi.org/10.18280/jesa.580820>.
24. Нерубацький В. П., Плахтій О. А., Цибульник В. Р., Гордієнко Д. А., Хоружевський Г. А. Аналіз показників енергоефективності автономних інверторів напруги з імпедансною і квазіімпедансною ланками у вхідному колі при застосуванні різних алгоритмів модуляції. *Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті*. 2020. Том 25, № 3. С. 19–31. <https://doi.org/10.18664/ikszt.v25i3.214089>.
25. 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>.
26. Нерубацький В. П., Плахтій О. А., Кавун В. Є., Машура А. В., Гордієнко Д. А., Цибульник В. Р. Аналіз показників енергоефективності автономних інверторів напруги з різними типами модуляції. *Збірник наукових праць Українського державного університету залізничного транспорту*. 2018. Вип. 180. С. 106–120.
27. Плахтій А. А., Нерубацький В. П., Кавун В. Є., Машура А. В. Компенсация высших гармоник входных токов в системах с параллельным включением автономных инверторов. *Електротехнічні та комп'ютерні системи*. 2018. № 27 (103). С. 65–74. <https://doi.org/10.15276/eltecs.27.103.2018.07>.
28. Ha V. T., Giang P. T., Vu P. Multilevel inverter application for railway traction motor control. *Bulletin of Electrical Engineering and Informatics*. 2022. Vol. 11, No. 4. P. 1855–1866. <https://doi.org/10.11591/eei.v11i4.3964>.
29. Ha V. T., Giang P. T., Phuong V. H. T-type multi-inverter application for traction motor control. *Engineering, Technology & Applied Science Research*. 2022. Vol. 12, No. 2. P. 8321–8327. <https://doi.org/10.48084/etasr.4776>.
30. Ha V. T., Vinh V. Q. Sliding mode control of a PMSM railway traction drive fed by multi-level inverter. *TELKOMNIKA Telecommunication Computing Electronics and Control*. 2023. Vol. 21, No. 6. P. 1405–1414. <https://doi.org/10.12928/TELKOMNIKA.v21i6.24369>.
31. Нерубацький В. П., Гордієнко Д. А. Система керування компенсаційного 4QS-перетворювача електричного рухомого складу. Матеріали 4-ї міжнародної науково-технічної конференції «Інтелектуальні транспортні технології» (Харків, УкрДУЗТ, 27–28 листопада 2023 р.). Харків: УкрДУЗТ, 2023. С. 258–260.
32. Нерубацький В. П., Гордієнко Д. А.

ІНФОРМАЦІЙНО-КЕРУЮЧІ СИСТЕМИ НА ЗАЛІЗНИЧНОМУ ТРАНСПОРТІ

- Енергоєфективна топологія трирівневого активного випрямляча електричного рухомого складу. Тези стендових доповідей та виступів учасників 36-ї міжнародної науково-практичної конференції «Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті» (Харків, УкрДУЗТ, 16–17 листопада 2023 р.). *Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті*. 2023. № 3 (додаток). С. 14–15.
33. Nerubatskyi V. P., Hordiienko D. A. Energy efficient modulation algorithm of four-quadrant converter with power factor correction. Тези десятої міжнародної науково-технічної конференції «Інформатика, управління та штучний інтелект (ІУШІ-2023)» (Харків – Краматорськ – Тернопіль, НТУ «ХП» – ДДМА, 10–12 травня 2023 р.). Харків: НТУ «ХП», 2023. С. 63.
34. Nerubatskyi V. P., Hordiienko D. A. Application of control systems active four-quadrant rectifiers on traction electric rolling stock. Abstracts of the XII International Scientific and Practical Conference “Current issues, achievements and prospects of Science and education” (Greece, Athens, May 03–05, 2021). P. 232–233.
35. Нерубацький В. П., Плахтій О. А. Система керування трифазного чотириквADRANTНОГО активного випрямляча з постійною частотою комутації силових ключів. Матеріали 78 міжнародної науково-практичної конференції «Проблеми та перспективи розвитку залізничного транспорту» (Дніпро, ДНУЗТ імені академіка В. Лазаряна, 17–18 травня 2018 р.). Дніпро: ДНУЗТ імені академіка В. Лазаряна, 2018. С. 108–109.
36. Hamani K., Kuchar M., Kubatko M., Kirschner S. Advancements in induction motor fault diagnosis and condition monitoring: A Comprehensive Review. *Sensors*. 2025. Vol. 25, Iss. 19. 5942. <https://doi.org/10.3390/s25195942>.
37. Enache S., Vlad I., Enache M. A. Aspects regarding the optimization of cross geometry in traction asynchronous motors using the theory of nonlinear circuits. *Energies*. 2022. Vol. 15, Iss. 18. 6648. <https://doi.org/10.3390/en15186648>.
38. Goolak S., Liubarskyi B., Lukoševičius V., Keršys R., Keršys A. Operational diagnostics system for asymmetric emergency modes in traction drives with direct torque control. *Applied Sciences*. 2023. Vol. 13, Iss. 9. 5457. <https://doi.org/10.3390/app13095457>.
39. Goolak S., Tkachenko V., Šťastniak P., Sapronova S., Liubarskyi B. Analysis of control methods for the traction drive of an alternating current electric locomotive. *Symmetry*. 2022. Vol. 14, Iss. 1. 150. <https://doi.org/10.3390/sym14010150>.
40. Hannan M. A., Ali J. A., Mohamed A., Hussain A. Optimization techniques to enhance the performance of induction motor drives: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2018. Vol. 81, Part 2. P. 1611–1626. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.05.240>.
41. Eser E., Doğan Z. Eccentricity fault in induction motors using statistical process control method. *International Scientific and Vocational Studies Journal*. 2024. Vol. 8, Iss. 2. P. 192–201. <https://doi.org/10.47897/bilmes.1583712>.
42. Панченко В. В., Туренко О. Г. Дослідження роботи тягового асинхронного двигуна при несиметрії живильної напруги та аварійних режимах роботи. *Збірник наукових праць Українського державного університету залізничного транспорту*. 2021. Вип. 198. С. 145–150. <https://doi.org/10.18664/1994-7852.198.2021.256648>.
43. Ha V. T., Hai N. V., Vinh V. Q., Ha V. T. Design of sliding mode control for an induction motor using in railway traction. *International Journal of Engineering Trends and Technology*. 2022. Vol. 70, Iss. 6. P. 331–336. <https://doi.org/10.14445/22315381/IJETT-V70I6P234>.
44. Goolak S., Liubarskyi B., Riabov I., Cherpurna N., Pohosov O. Simulation of a direct torque control system in the presence of winding asymmetry in induction motor. *Engineering Research Express*. 2023. No. 5. 025070. <https://doi.org/10.1088/2631-8695/acde46>.
45. Silaghi H., Spoială V., Păcală A., Romocea M. Asynchronous machines with PWM inverters: A novel approach to DTC enhancement. *The Scientific Bulletin of Electrical Engineering Faculty*. 2024. Vol. 24, Iss. 2. P. 17–21. <https://doi.org/10.2478/sbeef-2024-0016>.
46. Zhang J., Su H., Ren Q., Li W., Zhou H. Review on development and key technologies of permanent magnet synchronous traction system for rail transit. *Journal of Traffic and Transportation Engineering*. 2021. Vol. 21, Iss. 6. P. 63–77. <https://doi.org/10.19818/j.cnki.1671-1637.2021.06.005>.
47. Peng Y., Chen F., Chen F., Wu C., Wang Q., He Z., Lu S. Energy-efficient train control: A comparative study based on permanent magnet synchronous motor and induction motor. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*. 2024. P. 1–13. <https://doi.org/10.1109/TVT.2024.3412941>.
48. Drancă M., Chirca M., Breban Ș., Fărtan M. Thermal and demagnetization analysis of an axial-flux permanent magnet synchronous machine. 2020 *International Conference and Exposition on Electrical and Power Engineering (EPE)*. 2020. <https://doi.org/10.1109/EPE50722.2020.9305576>.

ІНФОРМАЦІЙНО-КЕРУЮЧІ СИСТЕМИ НА ЗАЛІЗНИЧНОМУ ТРАНСПОРТІ

49. Niu G., Jiang J., Youn B. D., Pecht M. Autonomous health management for PMSM rail vehicles through demagnetization monitoring and prognosis control. *ISA Transactions*. 2018. Vol. 72. P. 245–255. <https://doi.org/10.1016/j.isatra.2017.10.002>.
50. Kale S. V., Bhasme N. R. DC feeder voltage control strategy of bidirectional DC to DC converter for railway traction. *International Journal of Recent Technology and Engineering*. 2019. Vol. 8, Iss. 4. P. 5270–5274. <https://doi.org/10.35940/ijrte.D7433.118419>.
51. Prathab T., Yasoda K. Performance analysis of electric locomotive using matrix converter. *Journal of Electronics and Informatics*. 2023. Vol. 5, Iss. 2. P. 178–98. <https://doi.org/10.36548/jei.2023.2.006>.
52. Burkhanhodjaev A., Iksar E., Idriskhodjaeva M. An algorithm for controlling a traction asynchronous drive that minimizes electrical power losses. *E3S Web of Conferences*. 2020. Vol. 216. 01107. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202021601107>.
53. Shokhsanamkhon T. Traction of electric locomotives: Modern technologies and future innovations. *Spanish Journal of Innovation and Integrity*. 2025. Vol. 40. P. 98–101. <https://www.sjii.es/index.php/journal/article/view/314>.
54. Struharňanský L., Vittek J., Makyš P., Plončiak 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>.
55. Mazurenko L., Shykhnenko M., Dzhura O., Bilyk O., Chorna O. Control of switched reluctance motors of traction electric drives of railway transport. *Energetika*. 2025. Vol. 71, No. 1. P. 92–104. <https://doi.org/10.6001/energetika.2025.71.1.7>.
56. Zhang R., Yin Z., Zhan Z., Yu S. Research on internal model control and hybrid modulation strategy of a MW-level direct-drive PMSM for traction drives in electric locomotive. *Energy Reports*. 2023. Vol. 9, Suppl. 8. P. 688–698. <https://doi.org/10.1016/j.egyr.2023.04.276>.
57. Kebede A. B., Worku G. B. Power electronics converter application in traction power supply system. *American Journal of Electrical Power and Energy Systems*. 2020. Vol. 9, Iss. 4. P. 67–73. <https://doi.org/10.11648/j.epes.20200904.12>.
58. Kabalyk Y. Determination of energy loss in power voltage inverters for power supply of locomotive traction motors. *Procedia Engineering*. 2016. Vol. 165. P. 1437–1443. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.11.876>.
59. Hu H., Liu Y., Li Y., He Z., Gao S., Zhu X., Tao H. Traction power systems for electrified railways: evolution, state of the art, and future trends. *Railway Engineering Science*. 2024. Vol. 32. P. 1–19. <https://doi.org/10.1007/s40534-023-00320-6>.
60. 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. Том 29, № 2. С. 33–44. <https://doi.org/10.18664/iksz.v29i2.307651>.
61. Barinov I. A., Melnichenko O. V. Power IGBTs application in AC-wire DC-motor locomotive thyristor-based power circuit for regenerative brake energy efficiency increase. *2019 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing*. 2019. <https://doi.org/10.1109/ICIEAM.2019.8742933>.
62. Нерубацький В. П., Плахтій О. А., Гладка А. В. Покращення електромагнітної сумісності тягового електропривода змінного струму шляхом застосування 4QS-випрямлячів. *Збірник наукових праць Українського державного університету залізничного транспорту*. 2018. Вип. 178. С. 21–28. <https://doi.org/10.18664/1994-7852.178.2018.138906>.
63. Demydov O., Liubarskyi B., Domanskyi V., Glebova M., Iakunin D., Tyshchenko A. Determination of optimal parameters of the pulse width modulation of the 4qs transducer for electric rolling stock. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2018. Vol. 5, No. 5 (95). P. 29–38. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2018.143789>.
64. Plakhtii O., Nerubatskyi V., Sushko D., Ryshchenko I., Tsybulnyk V., Hordienko D. Improving energy characteristics of AC electric rolling stock by using the three-level active four-quadrant rectifiers. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2019. Vol. 4, No. 8 (100). P. 6–14. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2019.174112>.
65. He L., Xiong J., Ouyang H., Zhang P., Zhang K. High-performance indirect current control scheme for railway traction four-quadrant converters. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*. 2014. Vol. 61, Iss. 12. P. 6645–6654. <https://doi.org/10.1109/TIE.2014.2316240>.
66. Plakhtii O., Nerubatskyi V., Khomenko I., Tsybulnyk V., Syniavskyi 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>.
67. Нерубацький В. П., Зінченко О. С.,

ІНФОРМАЦІЙНО-КЕРУЮЧІ СИСТЕМИ НА ЗАЛІЗНИЧНОМУ ТРАНСПОРТІ

- Гордієнко Д. А. Комплексне дослідження роботи каскадного багаторівневого інвертора. Матеріали всеукраїнської науково-практичної конференції «Стан та перспективи розвитку електричного транспорту» (Харків, ХНУМГ імені О. М. Бекетова, 23–25 листопада 2022 р.). Харків: ХНУМГ імені О. М. Бекетова, 2022. С. 125–127.
68. Ha V. T., Vinh V. Q. Sliding mode control of a PMSM railway traction drive fed by multi-level inverter. *TELKOMNIKA*. 2023. Vol. 21, No. 6. P. 1405–1414. <http://doi.org/10.12928/telkomnika.v21i6.24369>.
69. Wang X., Zhang L., Wu P. Control and modeling of modular multi-level high voltage converter vector for rail trail traction. *International Core Journal of Engineering*. 2021. Vol. 7, Iss. 5. P. 299–307. [http://doi.org/10.6919/ICJE.202105_7\(5\).0039](http://doi.org/10.6919/ICJE.202105_7(5).0039).
70. Nerubatskyi V., Plakhtii O., Hordiienko D. Efficiency analysis of DC–DC converter with pulse-width and pulse-frequency modulation. *2022 IEEE 41st International Conference on Electronics and Nanotechnology (ELNANO). Proceedings*. 2022. P. 571–575. <https://doi.org/10.1109/ELNANO54667.2022.9926762>.
71. Ivakhno V., Zamaruiev V., Plakhtii O., Vinnikov D., Nerubatskyi V., Hordiienko D. Evaluation of the parameters of a soft switching DC/DC converter with a modified push-pull current source inverter stage for photovoltaic systems. *2024 IEEE 5th KhPI Week on Advanced Technology (KhPIWeek). Proceedings*. 2024. P. 1–6. <https://doi.org/10.1109/KhPIWeek61434.2024.10878068>.
72. Paul S. G., Ravichandran C. S. High frequency transformer in electric traction with bidirectional DC-DC converter using customized embedded system. *Microprocessors and Microsystems*. 2020. Vol. 77. P. 103162. <https://doi.org/10.1016/j.micpro.2020.103162>.
73. Goolak S., Kondratieva L., Riabov I., Lukoševičius V., Keršys A., Makaras R. Research and optimization of hybrid on-board energy storage system of an electric locomotive for quarry rail transport. *Energies*. 2023. Vol. 16, Iss. 7. P. 3293. <https://doi.org/10.3390/en16073293>.
74. Нерубацький В. П., Шаповалова Д. С. Перспективи застосування суперконденсаторних систем накопичення енергії на громадському електротранспорті. Матеріали XVII міжнародної науково-практичної конференції «Сучасні інформаційні та інноваційні технології на транспорті (MINTT – 2025)» (Одеса, ХДМА, 28–30 травня 2025 р.). Одеса: ХДМА, 2025. С. 70–71.
75. Нерубацький В. П., Гордієнко Д. А. Енергозбереження на залізничній тязі шляхом використання бортових акумуляторних батарей. Матеріали III всеукраїнської науково-практичної інтернет-конференції «Проблеми сучасної електроенергетики, електротехніки та електромеханіки у післявоєнному періоді» (Харків, ХНУМГ імені О. М. Бекетова, 19–21 жовтня 2022 р.). Харків: ХНУМГ імені О. М. Бекетова, 2022. С. 23–25.
76. Zeb O., Muhammad S., Ahmad I. Hybrid optimized control strategy for solid-state transformer-based electric locomotives integrating energy storage. *Journal of Energy Storage*. 2026. Vol. 154, Part C. P. 121251. <https://doi.org/10.1016/j.est.2026.121251>.
77. Щербак Я. В., Плахтій О. А., Нерубацький В. П. Регульовальні характеристики активного чотириквadrантного перетворювача в режимах випрямлення і рекуперації. *Технічна електродинаміка*. 2017. № 6. С. 26–31. <https://doi.org/10.15407/techned2017.06.026>.
78. Плахтій О. А., Нерубацький В. П., Сушко Д. Л., Кавун В. С. 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>.
79. Plakhtii O. A., Nerubatskyi V. P., Kavun V. Ye., Hordiienko D. A. Active single-phase four-quadrant rectifier with improved hysteresis modulation algorithm. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*. 2019. No. 5 (173). P. 93–98. <https://doi.org/10.29202/nvngu/2019-5/16>.
80. Plakhtii O., Nerubatskyi V., Karpenko N., Hordiienko D., Butova O., Khoruzhevskiy H. Research into energy characteristics of single-phase active four-quadrant rectifiers with the improved hysteresis modulation. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2019. Vol. 5, No. 8 (101). P. 36–44. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2019.179205>.
81. Liubarskyi B., Petrenko A., Shaida V., Maslii A. Analysis of optimal operating modes of the induction traction drives for establishing a control algorithm over a semiconductor transducer. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2017. Vol. 4, No. 8 (88). P. 65–72. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2017.109179>.
82. Рябов Є. С., Кондратьєва Л. Ю., Овер'янова Л. В., Єрціян Б. Х., Гулак С. О. Обґрунтування структури тягового електропривода електровоза для залізничного кар'єрного транспорту. *Наука та прогрес транспорту*. 2022. № 2(98). С. 26–44. <https://doi.org/10.15802/stp2022/267984>.
83. Iliev I., Suslov K., Kryukov A.,

- Cherepanov A., Beloiev I., Valeeva Y. Modeling of energy recovery processes in railway traction power supply systems. *Energy Reports*. 2024. Vol. 11. P. 5163–5171. <https://doi.org/10.1016/j.egy.2024.05.012>.
84. Wu L., Wu M. Utilisation of regenerative braking energy in adjacent power sections of railway systems. *IET Electric Power Applications*. 2024. Vol. 18, Iss. 2. P. 174–184. <https://doi.org/10.1049/elp2.12378>.
85. Plakhtii O., Nerubatskyi V., Sushko D., Hordiienko D., Khoruzhevskiy H. Improving the harmonic composition of output voltage in multilevel inverters under an optimum mode of amplitude modulation. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2020. Vol. 2, No. 8 (104). P. 17–24. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2020.200021>.
86. Gabaldón A., Ruiz-Abellón M. C., Martínez F., Guillamón A. Demand management in hybrid locomotives through aggregated models of supercapacitors and railway units. *Applied Sciences*. 2025. Vol. 15, Iss. 5. P. 2412. <https://doi.org/10.3390/app15052412>.
87. Kostenko I., Nezlina O., Maliuk S., Lysenko Y., Popovich D. Development of the traction system structure of a shunting diesel locomotive with a hybrid power supply scheme. *Transport Systems and Technologies*. 2024. No. 43. P. 100–110. <https://doi.org/10.32703/2617-9059-2024-43-8>.
88. Kobayashi H., Kawagoe N., Kondo K., Iwasaki T., Tsumura A. Method to design control system of traction inverter of DC-electrified railway vehicle for an increase in regenerative brake power. *IEEE Journal of Industry Applications*. 2020. Vol. 9, Iss. 1. P. 92–101. <https://doi.org/10.1541/ieejia.9.92>.
89. Xu D., Zhang C., Song Q., Zhang L. Design and simulation of EMU traction control system based on Simulink. In: Pham D. T., Lei Y., Lou Y. (eds) *Mechanical Design and Simulation: Exploring Innovations for the Future. MDS 2024. Lecture Notes in Mechanical Engineering*. Springer, Singapore. 2025. P. 313–325. https://doi.org/10.1007/978-981-97-7887-4_25.
90. Нерубацький В. П. Підвищення енергоефективності роботи тягових електродвигунів локомотивів на основі рекуперативного гальмування та інтеграції систем накопичення енергії. Тези III міжнародної науково-практичної конференції «Енергетичні установки та альтернативні джерела енергії '2026» (Харків, ХНАДУ, 11–12 березня 2026 р.). Харків: ФОП Бровін О.В., 2026.
91. Нерубацький В. П. Вплив сучасних тягових електродвигунів і перетворювачів локомотивів на енергетичну ефективність, зниження викидів та покращення екологічної безпеки залізничного транспорту. Тези I міжнародної науково-практичної конференції «Технології безпеки: сучасні виклики та перспективи» (Харків, ЧДТУ, 12–13 березня 2026 р.). Харків: ЧДТУ, 2026.
92. Melnichenko O., Portnoj A., Linkov A., Grigorenko P., Shramko S. Improving the parameters of the regenerative braking mode of the thyristor rectifier-inverter converter by addition the diode-transistor discharge branch and new operation algorithm. *Transportation Research Procedia*. 2023. Vol. 68. P. 612–621. <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2023.02.084>.
93. Macan M. Presentation of a four-quadrant converter based system in traction applications – Reference to modeling, simulation and analysis. *2007 European Conference on Power Electronics and Applications*. 2007. <https://doi.org/10.1109/EPE.2007.4417646>.
94. Rong S., Zhou W., Hu X., Geng B., Xiao G. Railway power conditioner with energy storage system based on hybrid modular multilevel converter and its control strategy. *Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy*. 2022. Vol. 41, Iss. 7. P. 10–24. <https://doi.org/10.12067/ATEEE2108036>.
95. Kamel T., Amor P., Polater N., Zhang Y., Tian Z., Hillmansen S., Tricoli P. Development of a smart hybrid drive system with advanced logistics for railway applications. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2024. Vol. 52, Part B. P. 559–576. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2023.01.293>.
96. Nerubatskyi V. P. Problems and prospects for the implementation of brushless motors on traction rolling stock. *Збірник наукових праць Українського державного університету залізничного транспорту*. 2026. Вип. 215.
97. Нерубацький В. П. Аналіз експлуатаційної надійності безколекторних тягових двигунів локомотивів. Тези 3-ї міжнародної науково-технічної конференції «Прогресивні технології засобів транспорту» (Харків, УкрДУЗТ, 03–04 грудня 2025 р.). Харків: УкрДУЗТ, 2025. С. 11–13.
98. Nerubatskyi V. P. Investigation of the influence of external factors on the efficiency of locomotive traction motors. Матеріали XIII міжнародної науково-практичної конференції «Людина, суспільство, комунікативні технології» (Харків, УкрДУЗТ, 24 жовтня 2025 р.). Дніпро: Середняк Т. К., 2025. С. 217–219.
99. 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.
100. Zhou Z., Chen Z., Spiriyagin M., Aghaei J.,

ІНФОРМАЦІЙНО-КЕРУЮЧІ СИСТЕМИ НА ЗАЛІЗНИЧНОМУ ТРАНСПОРТІ

- Cole C., Zhai W. Modeling and dynamic characteristics analysis of the locomotive considering the electric transmission system. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*. 2026. Vol. 39. 100099. <https://doi.org/10.1016/j.cjme.2025.100099>.
101. Lukoševičius V., Goolak S., Derehuz I., Neduzha L., Keršys A., Dzerkelis V. Conceptual basis of adaptation of a field-oriented control system for traction induction motors to the operating parameters of a locomotive. *Energies*. 2026. Vol. 19, Iss. 2. 298. <https://doi.org/10.3390/en19020298>.
102. Panchenko S. V., Babaiev M. M., Nerubatskyi V. P. Analysis of the efficiency of operation of modern control systems for brushless traction motors. *Збірник наукових праць Українського державного університету залізничного транспорту*. 2025. Вип. 214. С. 181–200. <https://doi.org/10.18664/1994-7852.214.2025.352044>.
103. Tran C. D., Kuchar M., Nguyen P. D. Improved speed sensorless control for induction motor drives using rotor flux angle estimation. *Electrical Engineering & Electromechanics*. 2025. No. 6. P. 93–97. <https://doi.org/10.20998/2074-272X.2025.6.12>.
104. Tran C. D., Kuchar M., Sotola V., Nguyen P. D. Sensor fault diagnosis strategy based on rotor flux observers in three-phase induction motor drive. *Scientific Report*. 2026. Vol. 16. 267. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-29381-9>.
105. 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 – PEMS'2025»* (Київ, НТУУ «КПІ імені Ігоря Сікорського», 18–20 листопада 2025 р.). Київ: НТУУ «КПІ імені Ігоря Сікорського», 2025. С. 118–119.
106. Стьопкін В. В., Смірнов Г. М., Науменко В. В., Свободін О. О. Актуальність системи прямого керування моментом асинхронного двигуна. *Тези доповідей міжнародної науково-технічної конференції «Інформаційні технології в металургії та машинобудуванні – ITMM'2023»* (Дніпро, 22 березня 2023 р.). Дніпро, 2023. С. 200–203. <https://doi.org/10.34185/1991-7848.itmm.2023.01.055>.
107. Usha S., Geetha P., Geetha A., Palanisamy R., Thamizh Thentral T. M., Mahato B., Giri N. C., Alharbi M. Performance enhancement of sensorless induction motor drive using modified direct torque control techniques for traction application. *Alexandria Engineering Journal*. 2024. Vol. 108. P. 518–538. <https://doi.org/10.1016/j.aej.2024.07.095>.
108. Plakhtiy A., Nerubatskyi V., Tsybulnyk V. Stabilization of voltages on capacitors of cells in modular multilevel inverters with space-vector PWM. *Вісник НТУ «ХПИ». Серія: Електричні машини та електромеханічне перетворення енергії*. 2019. № 20 (1345). С. 42–52. <https://doi.org/10.20998/2409-9295.2019.20.06>.
109. Goolak S., Kyrychenko M. Thermal model of the output traction converter of an electric locomotive with induction motors. *Problemele Energeticii Regionale*. 2022. No. 3(55). P. 1–16. <https://doi.org/10.52254/1857-0070.2022.3-55.01>.
110. Vijayan V., Ashok S. High-performance bi-directional Z-source inverter for locomotive drive application. *IET Electrical Systems in Transportation*. 2015. Vol. 5, Iss. 4. P. 166–174. <https://doi.org/10.1049/iet-est.2014.0053>.
111. Zhang R., Lin F., Yang Z., Cao H., Liu Y. A harmonic resonance suppression strategy for a high-speed railway traction power supply system with a SHE-PWM four-quadrant converter based on active-set secondary optimization. *Energies*. 2017. Vol. 10, Iss. 10. 1567. <https://doi.org/10.3390/en10101567>.
112. Kejian S., Konstantinou G., Jing L., Mingli W., Agelidis V. G. High performance control strategy for single-phase three-level neutral-point-clamped traction four-quadrant converters. *IET Power Electronics*. 2017. Vol. 10, Iss. 8. P. 884–893. <https://doi.org/10.1049/iet-pel.2016.0153>.
113. 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>.
114. Plakhtii O., Tsybulnyk V., Nerubatskyi V., Mittsel N. The analysis of modulation algorithms and electromagnetic processes in a five-level voltage source inverter with clamping diodes. *2019 IEEE International Conference on Modern Electrical and Energy Systems (MEES). Proceedings*. 2019. P. 294–297. <https://doi.org/10.1109/MEES.2019.8896567>.
115. Нерубацький В. П., Плахтій О. А., Карпенко Н. П., Гордієнко Д. А., Цибульник В. Р. Аналіз енергетичних процесів у семирівневному автономному інверторі напруги при різних алгоритмах модуляції. *Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті*. 2019. Том 24, № 5. С. 8–18. <https://doi.org/10.18664/iksz.v24i5.181286>.
116. Souad R., Zeroug H. Comparison between direct torque control and vector control of a permanent magnet synchronous motor drive. *2008 13th International Power Electronics and Motion Control Conference*. 2008.

<https://doi.org/10.1109/EPEPEMC.2008.4635433>.

117. Kolano K. New method of vector control in PMSM motors. *IEEE Access*. 2023. Vol. 11. P. 43882–43890. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2023.3272273>.

118. Riabov I., Goolak S., Kondratieva L., Overianova L. Increasing the energy efficiency of the multi-motor traction electric drive of an electric locomotive for railway quarry transport. *Engineering Science and Technology, an International Journal*. 2023. Vol. 42. P. 101416. <https://doi.org/10.1016/j.jestch.2023.101416>.

119. Дубравін Ю., Ткаченко В., Співак О. Підвищення енергетичної ефективності тягового електропривода електровоза змінного струму. *Збірник наукових праць ДУІТ. Серія «Транспортні системи і технології»*. 2021. Вип. 38. С. 36–52. <https://doi.org/10.32703/2617-9040-2021-38-36-4>.

120. Ma J., Luo C., Qiu L., Liu X., Xu B., Shou J., Fang Y. Recent advances in traction drive technology for rail transit. *Journal of Zhejiang University-SCIENCE A*. 2023. Vol. 24. P. 177–188. <https://doi.org/10.1631/jzus.A2200285>.

121. Liu G., Wu Y., Li K., Wang Y., Li C. Z. Development of high power SiC devices for rail traction power systems. *Journal of Crystal Growth*. 2019. Vol. 507. P. 442–452. <https://doi.org/10.1016/j.jcrysgro.2018.10.037>.

122. Nerubatskyi V., Plakhtii O., Hordiienko D., Khoruzhevskiy H. Prospects for the development of power electronics by application of technologies for production of power semiconductor switches based on silicon carbide. *International scientific journal «Industry 4.0»*. 2020. Vol. 5, Iss. 4. P. 170–173.

123. Umegami H., Harada T., Nakahara K. Performance comparison of Si IGBT and SiC MOSFET power module driving IPMSM or IM under WLTC. *World Electric Vehicle Journal*. 2023. Vol. 14, Iss. 4. P. 112. <https://doi.org/10.3390/wevj14040112>.

124. Abdalgader I. A. S., Kivrak S., Özer T. Power performance comparison of SiC-IGBT and Si-IGBT switches in a three-phase inverter for aircraft applications. *Micromachines*. 2022. Vol. 13, Iss. 2. P. 313. <https://doi.org/10.3390/mi13020313>.

125. 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>.

126. Wang X., Zhang L., Wu P. Control and modeling of modular multi-level high voltage converter vector for rail trail traction. *International Core Journal of*

Engineering. 2021. Vol. 7, Iss. 5. p. 299–307. [https://doi.org/10.6919/ICJE.202105_7\(5\).0039](https://doi.org/10.6919/ICJE.202105_7(5).0039).

127. Plakhtii O., Nerubatskyi V., Karpenko N., Ananieva O., Khoruzhevskiy H., Kavun V. Studying a voltage stabilization algorithm in the cells of a modular six-level inverter. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2019. Vol. 6, No. 8 (102). P. 19–27. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2019.185404>.

128. Ma F., Xu Q., He Z., Tu C., Shuai Z., Luo A. A railway traction power conditioner using modular multilevel converter and its control strategy for high-speed railway system. *IEEE Transactions on Transportation Electrification*. 2016. Vol. 2, Iss. 1. P. 96–109. <https://doi.org/10.1109/TTE.2016.2515164>.

129. Tanta M., Barros L. A. M., Pinto J. G., Martins A. P., Afonso J. L. Modular multilevel converter in electrified railway systems: Applications of rail static frequency converters and rail power conditioners. *2020 International Young Engineers Forum (YEF-ECE)*. 2020. <https://doi.org/10.1109/YEF-ECE49388.2020.9171814>.

130. Szelağ A., Jefimowski W., Maciołek T., Nikitenko A., Wiczorek M., Lewandowski M. Hybrid energy storage system for regenerative braking utilization and peak power decrease in 3 kV DC railway electrification system. *Electronics*. 2025. Vol. 14, Iss. 9. P. 1752. <https://doi.org/10.3390/electronics14091752>.

131. Kostenko I., Nezlina O., Maliuk S., Lysenko Y., Popovich D. Development of the traction system structure of a shunting diesel locomotive with a hybrid power supply scheme. *Transport Systems and Technologies*. 2024. No. 43. P. 100–110. <https://doi.org/10.32703/2617-9059-2024-43-8>.

132. Нерубацький В. П. Моніторинг технічного стану безколекторних тягових двигунів завдяки залученню цифрових технологій сьогодення. Тези доповідей 6-ї міжнародної науково-технічної конференції «Інтелектуальні транспортні технології» (Харків, УкрДУЗТ, 24–26 листопада 2025 р.). Харків: УкрДУЗТ, 2025. С. 81–83.

133. 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 наукової конференції «Наукові підсумки 2025 року» (Харків, 18 грудня 2025 р.). Харків: ПП «Технологічний Центр», 2025. С. 29.

134. Yingming T., Kenan D., Jianfeng Q., Li F., Yi C. A learning observer-based control strategy for PMSM with position sensor fault in railway. *Control Engineering Practice*. 2024. Vol. 142. P. 105705. <https://doi.org/10.1016/j.conengprac.2023.105705>.

135. Xie Q., Xu Q., Luo L., Tu Y., Song W. Sensorless induction motor control based on an improved full-order state observer. *Energies*. 2025. Vol. 18, Iss. 16. 4374. <https://doi.org/10.3390/en18164374>.
136. Qiu W., Zhao X., Tyrrell A., Perinpanayagam S., Niu S., Wen G. Application of artificial intelligence-based technique in electric motors: A review. *IEEE Transactions on Power Electronics*. 2024. Vol. 39, Iss. 10. P. 13543–13568. <https://doi.org/10.1109/TPEL.2024.3410958>.
137. Huang Z., Gong J., Xiao X., Gao Y., Xia Y., Wheeler P., Ji B. Artificial intelligence and digital twin technologies for power converter control in transportation applications: A review. *IET Power Electronics*. 2025. Vol. 18, Iss. 1. e70013. <https://doi.org/10.1049/pel2.70013>.
- References
1. **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>
 2. **Nerubatskyi, V. P. (2026)**. Features of the use of brushless motors in traction rolling stock. *Informatsiino-keruiuchi systemy na zaliznychnomu transporti*, 31(1).
 3. **Enache, S., Enache, M.-A., & Vlad, I. (2024)**. Considerations regarding the middle power asynchronous motors for railway electrical traction. *Energies*, 17(17), Article 4327. <https://doi.org/10.3390/en17174327>
 4. **Paul, S., Han, P.-W., Chang, J., Chun, Y.-D., & Lee, J.-G. (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.egy.2022.10.411>
 5. **Goolak, S., Liubarskyi, B., Riabov, I., Lukoševičius, V., Keršys, A., & Kilikevičius, S. (2023)**. Analysis of the efficiency of traction drive control systems of electric locomotives with asynchronous traction motors. *Energies*, 16(9), Article 3689. <https://doi.org/10.3390/en16093689>
 6. **Polater, N., & Tricoli, P. (2022)**. Technical review of traction drive systems for light railways. *Energies*, 15(9), Article 3187. <https://doi.org/10.3390/en15093187>
 7. **Spejo, L. B., Akor, I., Rahimo, M., & Minamisawa, R. A. (2023)**. Life-cycle energy demand comparison of medium voltage Silicon IGBT and Silicon Carbide MOSFET power semiconductor modules in railway traction applications. *Power Electronic Devices and Components*, 6, Article 100050. <https://doi.org/10.1016/j.pedc.2023.100050>
 8. **Biel, Z., Pčola, M., Ondřejička, J., Franko, M., & Frivaldský, M. (2023)**. Efficiency comparison of Si IGBT and SiC MOSFET based three-phase inverters. *Communications – Scientific Letters of the University of Zilina*, 25(3), C56–C61. <https://doi.org/10.26552/com.C.2023.057>
 9. **Rodrigues, N., Cunha, J., Monteiro, V., & Afonso, J. L. (2023)**. Railway auxiliary power supply system: A modular multilevel converter approach. *Transportation Research Procedia*, 72, 3182–3189. <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2023.11.877>
 10. **Iraklis, A., Schirmer, T., Dittus, H., Lusiewicz, A., & Winter, J. (2019)**. Overview of three-stage power converter topologies for medium frequency-based railway vehicle traction systems. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 68(4), 3268–3278. <https://doi.org/10.1109/TVT.2019.2895500>
 11. **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), Article 33. <https://doi.org/10.3390/engproc2024079033>
 12. **Anh, A. T. H. T., & Tung, N. M. (2024)**. Speed control for traction motor of urban electrified train in field weakening region based on backstepping method. *Bulletin of Electrical Engineering and Informatics*, 13(3), 1504–1512. <https://doi.org/10.11591/eei.v13i3.5209>
 13. **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>
 14. **Travieso-Torres, J. C., Ricaldi-Morales, A. J., & Aguila-Camacho, N. (2024)**. Robust combined adaptive passivity-based control for induction motors. *Machines*, 12(4), Article 272. <https://doi.org/10.3390/machines12040272>
 15. **Dubravín, Y., Tkachenko, V., & Morneva, M. (2023)**. Improving the energy characteristics of a four-quadrant converter with pulse-width modulation. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 3(5 (123)), 24–32. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2023.283271>
 16. **Gao, J., Chen, Z., Dai, L., Huang, S., & Xu, W. (2022)**. Research on feedforward control of four-quadrant converter based on load current observer. *Energy Reports*, 8(Suppl. 5), 998–1008. <https://doi.org/10.1016/j.egy.2022.02.156>
 17. **Li, H., Jin, Z., Zhao, L., Ma, C., Li, S., Diao, L., & Wang, X. (2025)**. Grid-forming four-quadrant converter for railway traction application: A proposal considering specific operational scenario in railway. *TechRxiv*, 1–10. <https://doi.org/10.36227/techrxiv.175735881.15879772/v1>
 18. **Henda, B., & Khedher, A. (2025)**. Predictive torque control for induction machine fed by voltage source inverter: Theoretical and experimental analysis on acoustic noise. *Acoustics*, 7(4), Article 63. <https://doi.org/10.3390/acoustics7040063>

19. Khvorost, M. V., & Voronov, R. V. (2020). Doslidzhennia system skaliarnoho keruvannia tiahovymy asynkhronnymy dvuhunamy, shcho zhyvliatsia vid odnogo invertora [Investigation of scalar control systems for traction asynchronous motors fed from a single inverter]. *Komunalne hospodarstvo mist*, 1(154), 33–40. <https://doi.org/10.33042/2522-1809-2020-1-154-33-40> [in Ukrainian].
20. Abouzeid, A. F., 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), Article 700. <https://doi.org/10.3390/en13030700>
21. Dinh, B. H., & Tran, C. D. (2024). Improved scalar control based on slip compensation from virtual speeds in three-phase induction motor drives. *International Journal of Power Electronics and Drive Systems*, 15(3), 1410–1416. <https://doi.org/10.11591/ijpeds.v15.i3.pp1410-1416>
22. Lee, K., & Han, Y. (2022). Reactive-power-based robust MTPA control for v/f scalar-controlled induction motor drives. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 69(1), 169–178. <https://doi.org/10.1109/TIE.2021.3055183>
23. Hasni, A., El Fadil, H., Lassioui, A., El Asri, Y., El Ancary, M., Abbade, H., & Mouyane, M. (2025). Enhancing scalar control of induction motors using super-twisting sliding mode control: Experimental validation. *Journal Européen des Systèmes Automatisés*, 58(8), 1767–1776. <https://doi.org/10.18280/jesa.580820>
24. Nerubatskyi, V. P., Plakhtii, O. A., Tsybulnyk, V. R., Hordiienko, D. A., & Khoruzhevskyi, H. A. (2020). Analiz pokaznykiv enerhoefektyvnosti avtonomnykh inverteriv napruhy z impedansnoiu i kvaziimpedansnoiu lankamy u vkhidnomu koli pry zastosuvanni riznykh alhorytmiv moduliatsii [Analysis of energy efficiency indicators of autonomous voltage inverters with impedance and quasi-impedance links in the input circuit when applying different modulation algorithms]. *Informatsiino-keruiuchi systemy na zaliznychnomu transporti*, 25(3), 19–31. <https://doi.org/10.18664/iksz.v25i3.214089> [in Ukrainian].
25. 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(172)), 68–72. <https://doi.org/10.29202/nvngu/2019-4/9>
26. Nerubatskyi, V. P., Plakhtii, O. A., Kavun, V. Ye., Mashura, A. V., Hordiienko, D. A., & Tsybulnyk, V. R. (2018). Analiz pokaznykiv enerhoefektyvnosti avtonomnykh inverteriv napruhy z riznymy typamy moduliatsii [Analysis of energy efficiency indicators of autonomous voltage inverters with different types of modulation]. *Zbirnyk naukovykh prats Ukrainkoho derzhavnogo universytetu zaliznychnoho transportu*, (180), 106–120. [in Ukrainian].
27. Plakhtiy, A. A., Nerubatskiy, V. P., Kavun, V. E., & Mashura, A. V. (2018). Kompensatsiya vysshikh garmonik vkhodnykh tokov v sistemakh s parallelnym vklyuchenyem avtonomnykh inverterov [Compensation of higher harmonics of input currents in systems with parallel connection of autonomous inverters]. *Elektrotekhnichni ta kompiuterni systemy*, (27(103)), 65–74. <https://doi.org/10.15276/eltecs.27.103.2018.07> [in Russian].
28. Ha, V. T., Giang, P. T., & Vu, P. (2022). Multilevel inverter application for railway traction motor control. *Bulletin of Electrical Engineering and Informatics*, 11(4), 1855–1866. <https://doi.org/10.11591/eei.v11i4.3964>
29. Ha, V. T., Giang, P. T., & Phuong, V. H. (2022). T-type multi-inverter application for traction motor control. *Engineering, Technology & Applied Science Research*, 12(2), 8321–8327. <https://doi.org/10.48084/etasr.4776>
30. Ha, V. T., & Vinh, V. Q. (2023). Sliding mode control of a PMSM railway traction drive fed by multi-level inverter. *TELKOMNIKA Telecommunication Computing Electronics and Control*, 21(6), 1405–1414. <https://doi.org/10.12928/TELKOMNIKA.v21i6.24369>
31. Nerubatskyi, V. P., & Hordiienko, D. A. (2023). Systema keruvannia kompensatsiinoho 4QS-peretvoriuvacha elektrychnoho rukhomoho skladu [Control system of compensation 4QS-converter of electric rolling stock]. In *Materialy 4-i mizhnarodnoi naukovo-tekhnichnoi konferentsii "Intelektualni transportni tekhnolohii"* (pp. 258–260). UkrDUZT. [in Ukrainian].
32. Nerubatskyi, V. P., & Hordiienko, D. A. (2023). Enerhoefektyvna topolohiia tryrivnevoho aktyvnoho vypriamliacha elektrychnoho rukhomoho skladu [Energy-efficient topology of a three-level active rectifier of electric rolling stock]. *Informatsiino-keruiuchi systemy na zaliznychnomu transporti*, (3 (dodatok)), 14–15. [in Ukrainian].
33. Nerubatskyi, V. P., & Hordiienko, D. A. (2023). Energy efficient modulation algorithm of four-quadrant converter with power factor correction. In *Tezy desiatoi mizhnarodnoi naukovo-tekhnichnoi konferentsii "Informatyka, upravlinnia ta shtuchnyi intelekt (IUShI-2023)"* (p. 63). NTU "KhPI".
34. Nerubatskyi, V. P., & Hordiienko, D. A. (2021). Application of control systems active four-quadrant rectifiers on tractional electric rolling stock. In *Abstracts of the XII International Scientific and Practical Conference "Current issues, achievements and prospects of Science and education"* (pp. 232–233).
35. Nerubatskyi, V. P., & Plakhtii, O. A. (2018). Systema keruvannia tryfaznogo chotyrykvadrantnoho aktyvnoho vypriamliacha z postiinoiu chastotoiu komutatsii sylovykh kliuchiv [Control system of a three-phase four-quadrant active rectifier with constant switching frequency of power switches]. In *Materialy 78 mizhnarodnoi naukovo-*

- praktychnoi konferentsii "Problemy ta perspektyvy rozvytku zaliznychnoho transportu"* (pp. 108–109). DNUZT imeni akademika V. Lazariana. [in Ukrainian].
36. **Hamani, K., Kuchar, M., Kubatko, M., & Kirschner, S. (2025).** Advancements in induction motor fault diagnosis and condition monitoring: A comprehensive review. *Sensors*, 25(19), Article 5942. <https://doi.org/10.3390/s25195942>
37. **Enache, S., Vlad, I., & Enache, M. A. (2022).** Aspects regarding the optimization of cross geometry in traction asynchronous motors using the theory of nonlinear circuits. *Energies*, 15(18), Article 6648. <https://doi.org/10.3390/en15186648>
38. **Goolak, S., Liubarskyi, B., Lukoševičius, V., Keršys, R., & Keršys, A. (2023).** Operational diagnostics system for asymmetric emergency modes in traction drives with direct torque control. *Applied Sciences*, 13(9), Article 5457. <https://doi.org/10.3390/app13095457>
39. **Goolak, S., Tkachenko, V., Šťastniak, P., Saponova, S., & Liubarskyi, B. (2022).** Analysis of control methods for the traction drive of an alternating current electric locomotive. *Symmetry*, 14(1), Article 150. <https://doi.org/10.3390/sym14010150>
40. **Hannan, M. A., Ali, J. A., Mohamed, A., & Hussain, A. (2018).** Optimization techniques to enhance the performance of induction motor drives: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 81(Part 2), 1611–1626. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.05.240>
41. **Eser, E., & Doğan, Z. (2024).** Eccentricity fault in induction motors using statistical process control method. *International Scientific and Vocational Studies Journal*, 8(2), 192–201. <https://doi.org/10.47897/bilmes.1583712>
42. **Panchenko, V. V., & Turenko, O. H. (2021).** Doslidzhennia roboty tiahovoho asynkronnoho dvyhuna pry nesymetrii zhyvylnoi napruhy ta avariinykh rezhymakh roboty [Investigation of the operation of a traction asynchronous motor under supply voltage asymmetry and emergency operation modes]. *Zbirnyk naukovykh prats Ukrainського derzhavnoho universytetu zaliznychnoho transportu*, (198), 145–150. <https://doi.org/10.18664/1994-7852.198.2021.256648> [in Ukrainian].
43. **Ha, V. T., Hai, N. V., Vinh, V. Q., & Ha, V. T. (2022).** Design of sliding mode control for an induction motor using in railway traction. *International Journal of Engineering Trends and Technology*, 70(6), 331–336. <https://doi.org/10.14445/22315381/IJETT-V70I6P234>
44. **Goolak, S., Liubarskyi, B., Riabov, I., Chepurina, N., & Pohosov, O. (2023).** Simulation of a direct torque control system in the presence of winding asymmetry in induction motor. *Engineering Research Express*, 5, Article 025070. <https://doi.org/10.1088/2631-8695/acde46>
45. **Silaghi, H., Spoială, V., Păcală, A., & Romocea, M. (2024).** Asynchronous machines with PWM inverters: A novel approach to DTC enhancement. *The Scientific Bulletin of Electrical Engineering Faculty*, 24(2), 17–21. <https://doi.org/10.2478/sbeef-2024-0016>
46. **Zhang, J., Su, H., Ren, Q., Li, W., & Zhou, H. (2021).** Review on development and key technologies of permanent magnet synchronous traction system for rail transit. *Journal of Traffic and Transportation Engineering*, 21(6), 63–77. <https://doi.org/10.19818/j.cnki.1671-1637.2021.06.005>
47. **Peng, Y., Chen, F., Chen, F., Wu, C., Wang, Q., He, Z., & Lu, S. (2024).** Energy-efficient train control: A comparative study based on permanent magnet synchronous motor and induction motor. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 1–13. <https://doi.org/10.1109/TVT.2024.3412941>
48. **Drancă, M., Chirca, M., Breban, Ș., & Fărtan, M. (2020).** Thermal and demagnetization analysis of an axial-flux permanent magnet synchronous machine. In *2020 International Conference and Exposition on Electrical and Power Engineering (EPE)*. <https://doi.org/10.1109/EPE50722.2020.9305576>
49. **Niu, G., Jiang, J., Youn, B. D., & Pecht, M. (2018).** Autonomous health management for PMSM rail vehicles through demagnetization monitoring and prognosis control. *ISA Transactions*, 72, 245–255. <https://doi.org/10.1016/j.isatra.2017.10.002>
50. **Kale, S. V., & Bhasme, N. R. (2019).** DC feeder voltage control strategy of bidirectional DC to DC converter for railway traction. *International Journal of Recent Technology and Engineering*, 8(4), 5270–5274. <https://doi.org/10.35940/ijrte.D7433.118419>
51. **Prathab, T., & Yasoda, K. (2023).** Performance analysis of electric locomotive using matrix converter. *Journal of Electronics and Informatics*, 5(2), 178–198. <https://doi.org/10.36548/jei.2023.2.006>
52. **Burkhanhodjaev, A., Iksar, E., & Idriskhodjaeva, M. (2020).** An algorithm for controlling a traction asynchronous drive that minimizes electrical power losses. *E3S Web of Conferences*, 216, Article 01107. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202021601107>
53. **Shokhsanamkhon, T. (2025).** Traction of electric locomotives: Modern technologies and future innovations. *Spanish Journal of Innovation and Integrity*, 40, 98–101. <https://www.sjii.es/index.php/journal/article/view/314>
54. **Struharňanský, L., Vittek, J., Makyš, P., & Hončíak, 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>
55. **Mazurenko, L., Shykhnenko, M., Dzhura, O., Bilyk, O., & Chorna, O. (2025).** Control of switched reluctance motors of traction electric drives of railway transport. *Energetika*, 71(1), 92–104. <https://doi.org/10.6001/energetika.2025.71.1.7>
56. **Zhang, R., Yin, Z., Zhan, Z., & Yu, S. (2023).** Research on internal model control and hybrid modulation strategy of a MW-level direct-drive PMSM for traction drives in electric locomotive. *Energy*

- Reports, 9(Suppl. 8), 688–698. <https://doi.org/10.1016/j.egy.2023.04.276>
57. **Kebede, A. B., & Worku, G. B. (2020).** Power electronics converter application in traction power supply system. *American Journal of Electrical Power and Energy Systems*, 9(4), 67–73. <https://doi.org/10.11648/j.epes.20200904.12>
58. **Kabalyk, Y. (2016).** Determination of energy loss in power voltage inverters for power supply of locomotive traction motors. *Procedia Engineering*, 165, 1437–1443. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.11.876>
59. **Hu, H., Liu, Y., Li, Y., He, Z., Gao, S., Zhu, X., & Tao, H. (2024).** Traction power systems for electrified railways: Evolution, state of the art, and future trends. *Railway Engineering Science*, 32, 1–19. <https://doi.org/10.1007/s40534-023-00320-6>
60. **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 rectifier-inverter converter of electric locomotive]. *Informatsiino-keruiuchi systemy na zaliznychnomu transporti*, 29(2), 33–44. <https://doi.org/10.18664/iksz.v29i2.307651> [in Ukrainian].
61. **Barinov, I. A., & Melnichenko, O. V. (2019).** Power IGBTs application in AC-wire DC-motor locomotive thyristor-based power circuit for regenerative brake energy efficiency increase. In *2019 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing*. <https://doi.org/10.1109/ICIEAM.2019.8742933>
62. **Nerubatskyi, V. P., Plakhtii, O. A., & Hladka, A. V. (2018).** Pokrashchennia elektromahnitnoi sumisnosti tiahovoho elektropryvoda zminnoho strumu shliakhom zastosuvannia 4QS-vypriamliachiv [Improving electromagnetic compatibility of AC traction electric drive by applying 4QS rectifiers]. *Zbirnyk naukovykh prats Ukrainskoho derzhavnogo universytetu zaliznychnoho transportu*, (178), 21–28. <https://doi.org/10.18664/1994-7852.178.2018.138906> [in Ukrainian].
63. **Demydov, O., Liubarskyi, B., Domanskyi, V., Glebova, M., Iakunin, D., & Tyshchenko, A. (2018).** Determination of optimal parameters of the pulse width modulation of the 4qs transducer for electric rolling stock. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 5(5(95)), 29–38. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2018.143789>
64. **Plakhtii, O., Nerubatskyi, V., Sushko, D., Ryshchenko, I., Tsybulnyk, V., & Hordiienko, D. (2019).** Improving energy characteristics of AC electric rolling stock by using the three-level active four-quadrant rectifiers. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 4(8(100)), 6–14. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2019.174112>
65. **He, L., Xiong, J., Ouyang, H., Zhang, P., & Zhang, K. (2014).** High-performance indirect current control scheme for railway traction four-quadrant converters. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 61(12), 6645–6654. <https://doi.org/10.1109/TIE.2014.2316240>
66. **Plakhtii, O., Nerubatskyi, V., Khomenko, I., Tsybulnyk, V., & Syniavskyi, A. (2020).** Comprehensive study of cascade multilevel inverters with three level cells. In *2020 IEEE 7th International Conference on Energy Smart Systems (ESS) Proceedings* (pp. 277–282). <https://doi.org/10.1109/ESS50319.2020.9160258>
67. **Nerubatskyi, V. P., Zinchenko, O. Ye., & Hordiienko, D. A. (2022).** Kompleksne doslidzhennia roboty kaskadnoho bahatorivnevoho invertora [Comprehensive study of the operation of a cascade multilevel inverter]. In *Materialy vseukrainskoi naukovo-praktychnoi konferentsii "Stan ta perspektyvy rozvytku elektrychnoho transportu"* (pp. 125–127). KhNUMH imeni O. M. Beketova. [in Ukrainian].
68. **Ha, V. T., & Vinh, V. Q. (2023).** Sliding mode control of a PMSM railway traction drive fed by multi-level inverter. *TELKOMNIKA*, 21(6), 1405–1414. <http://doi.org/10.12928/telkomnika.v21i6.24369>
69. **Wang, X., Zhang, L., & Wu, P. (2021).** Control and modeling of modular multi-level high voltage converter vector for rail trail traction. *International Core Journal of Engineering*, 7(5), 299–307. [http://doi.org/10.6919/ICJE.202105_7\(5\).0039](http://doi.org/10.6919/ICJE.202105_7(5).0039)
70. **Nerubatskyi, V., Plakhtii, O., & Hordiienko, D. (2022).** Efficiency analysis of DC–DC converter with pulse-width and pulse-frequency modulation. In *2022 IEEE 41st International Conference on Electronics and Nanotechnology (ELNANO) Proceedings* (pp. 571–575). <https://doi.org/10.1109/ELNANO54667.2022.9926762>
71. **Ivakhno, V., Zamaruiev, V., Plakhtii, O., Vinnikov, D., Nerubatskyi, V., & Hordiienko, D. (2024).** Evaluation of the parameters of a soft switching DC/DC converter with a modified push-pull current source inverter stage for photovoltaic systems. In *2024 IEEE 5th KhPI Week on Advanced Technology (KhPIWeek) Proceedings* (pp. 1–6). <https://doi.org/10.1109/KhPIWeek61434.2024.10878068>
72. **Paul, S. G., & Ravichandran, C. S. (2020).** High frequency transformer in electric traction with bidirectional DC-DC converter using customized embedded system. *Microprocessors and Microsystems*, 77, Article 103162. <https://doi.org/10.1016/j.micpro.2020.103162>
73. **Goolak, S., Kondratieva, L., Riabov, I., Lukoševičius, V., Keršys, A., & Makaras, R. (2023).** Research and optimization of hybrid on-board energy storage system of an electric locomotive for quarry rail transport. *Energies*, 16(7), Article 3293. <https://doi.org/10.3390/en16073293>
74. **Nerubatskyi, V. P., & Shapovalova, D. S. (2025).** Perspektyvy zastosuvannia superkondensatornykh system nakopychennia enerhii na hromadskomu elektrotransporti [Prospects for applying supercapacitor energy storage systems on public electric transport]. In *Materialy XVII mizhnarodnoi naukovo-praktychnoi*

konferentsii "Suchasni informatsiini ta innovatsiini tekhnologii na transporti (MINTT - 2025)" (pp. 70–71). KhDMA. [in Ukrainian].

75. **Nerubatskyi, V. P., & Hordiienko, D. A. (2022).** Enerhozberezhennia na zaliznychnii tiazii shliakhom vykorystannia bortovykh akumuliatornykh batarei [Energy saving in railway traction by using on-board rechargeable batteries]. In *Materialy III vseukrainskoi naukovo-praktychnoi internet-konferentsii "Problemy suchasnoi elektroenerhetyky, elektrotekhniki ta elektromekhaniky u pislivoiennomu periody"* (pp. 23–25). KhNUMH imeni O. M. Beketova. [in Ukrainian].

76. **Zeb, O., Muhammad, S., & Ahmad, I. (2026).** Hybrid optimized control strategy for solid-state transformer-based electric locomotives integrating energy storage. *Journal of Energy Storage*, 154(Part C), Article 121251. <https://doi.org/10.1016/j.est.2026.121251>

77. **Shcherbak, Ya. V., Plakhtii, O. A., & Nerubatskyi, V. P. (2017).** Rehuliuvalni kharakterystyky aktyvnoho chotyrykvadrantnoho peretvoriuvacha v rezhymakh vypriamlennia i rekuperatsii [Regulatory characteristics of an active four-quadrant converter in rectification and recuperation modes]. *Tekhnichna elektrodynamika*, (6), 26–31. <https://doi.org/10.15407/techned2017.06.026> [in Ukrainian].

78. **Plakhtii, O. A., Nerubatskyi, V. P., Sushko, D. L., & Kavun, V. Ye. (2018).** Znyzhennia dynamichnykh vtrat v aktyvnomu odnofaznomu chotyrykvadrantnomu peretvoriuvachi z pokrashchenym alhorytmom histerezysnoi moduliatsii [Reduction of dynamic losses in an active single-phase four-quadrant converter with an improved hysteresis modulation algorithm]. *Pratsi Instytutu elektrodynamiky Natsionalnoi akademii nauk Ukrainy*, (51), 88–94. <https://doi.org/10.15407/publishing2018.51.088> [in Ukrainian].

79. **Plakhtii, O. A., Nerubatskyi, V. P., Kavun, V. Ye., & Hordiienko, D. A. (2019).** Active single-phase four-quadrant rectifier with improved hysteresis modulation algorithm. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*, (5(173)), 93–98. <https://doi.org/10.29202/nvngu/2019-5/16>

80. **Plakhtii, O., Nerubatskyi, V., Karpenko, N., Hordiienko, D., Butova, O., & Khoruzhevskiy, H. (2019).** Research into energy characteristics of single-phase active four-quadrant rectifiers with the improved hysteresis modulation. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 5(8(101)), 36–44. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2019.179205>

81. **Liubarskyi, B., Petrenko, A., Shaida, V., & Maslii, A. (2017).** Analysis of optimal operating modes of the induction traction drives for establishing a control algorithm over a semiconductor transducer. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 4(8(88)), 65–72. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2017.109179>

82. **Riabov, Ye. S., Kondratieva, L. Yu., Overianova, L. V., Yeritsian, B. Kh., & Hulak, S. O. (2022).** Obhruntuvannia struktury tiahovoho elektropyvoda elektrovoza dlia zaliznychnoho kariernoho

transportu [Substantiation of the structure of traction electric drive of electric locomotive for railway quarry transport]. *Nauka ta prohres transportu*, (2(98)), 26–44. <https://doi.org/10.15802/stp2022/267984> [in Ukrainian].

83. **Iliev, I., Suslov, K., Kryukov, A., Cherepanov, A., Beloiev, I., & Valeeva, Y. (2024).** Modeling of energy recovery processes in railway traction power supply systems. *Energy Reports*, 11, 5163–5171. <https://doi.org/10.1016/j.egyr.2024.05.012>

84. **Wu, L., & Wu, M. (2024).** Utilisation of regenerative braking energy in adjacent power sections of railway systems. *IET Electric Power Applications*, 18(2), 174–184. <https://doi.org/10.1049/elp2.12378>

85. **Plakhtii, O., Nerubatskyi, V., Sushko, D., Hordiienko, D., & Khoruzhevskiy, H. (2020).** Improving the harmonic composition of output voltage in multilevel inverters under an optimum mode of amplitude modulation. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2(8(104)), 17–24. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2020.200021>

86. **Gabaldón, A., Ruiz-Abellón, M. C., Martínez, F., & Guillamón, A. (2025).** Demand management in hybrid locomotives through aggregated models of supercapacitors and railway units. *Applied Sciences*, 15(5), Article 2412. <https://doi.org/10.3390/app15052412>

87. **Kostenko, I., Nezlina, O., Maliuk, S., Lysenko, Y., & Popovich, D. (2024).** Development of the traction system structure of a shunting diesel locomotive with a hybrid power supply scheme. *Transport Systems and Technologies*, (43), 100–110. <https://doi.org/10.32703/2617-9059-2024-43-8>

88. **Kobayashi, H., Kawagoe, N., Kondo, K., Iwasaki, T., & Tsumura, A. (2020).** Method to design control system of traction inverter of DC-electrified railway vehicle for an increase in regenerative brake power. *IEEE Journal of Industry Applications*, 9(1), 92–101. <https://doi.org/10.1541/ieejia.9.92>

89. **Xu, D., Zhang, C., Song, Q., & Zhang, L. (2025).** Design and simulation of EMU traction control system based on Simulink. In D. T. Pham, Y. Lei, & Y. Lou (Eds.), *Mechanical design and simulation: Exploring innovations for the future* (Lecture Notes in Mechanical Engineering, pp. 313–325). Springer. https://doi.org/10.1007/978-981-97-7887-4_25

90. **Nerubatskyi, V. P. (2026).** Pidvyshchennia enerhoefektyvnosti roboty tiahovykh elektrodvyhuniv lokomotyviv na osnovi rekuperatyvnoho halmuvannia ta intehratsii system nakopychennia enerhii [Increasing energy efficiency of locomotive traction motors operation based on regenerative braking and integration of energy storage systems]. In *Tezy III mizhnarodnoi naukovo-praktychnoi konferentsii "Enerhetychni ustanovky ta alternatyvni dzhherela enerhii '2026"*. FOP Brovin O.V. [in Ukrainian].

91. **Nerubatskyi, V. P. (2026).** Vplyv suchasnykh tiahovykh elektrodvyhuniv i peretvoriuvachiv lokomotyviv na enerhetychnu efektyvnist, znyzhennia vykydiv ta pokrashchennia ekolohichnoi bezpeky

zaliznychnoho transportu [Impact of modern locomotive traction motors and converters on energy efficiency, emission reduction and improvement of ecological safety of railway transport]. In *Tezy I mizhnarodnoi naukovo-praktychnoi konferentsii "Tekhnologii bezpeky: suchasni vyklyky ta perspektyvy"*. ChDTU. [in Ukrainian].

92. **Melnichenko, O., Portnoj, A., Linkov, A., Grigorenko, P., & Shramko, S. (2023)**. Improving the parameters of the regenerative braking mode of the thyristor rectifier-inverter converter by addition the diode-transistor discharge branch and new operation algorithm. *Transportation Research Procedia*, 68, 612–621. <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2023.02.084>

93. **Macan, M. (2007)**. Presentation of a four-quadrant converter based system in traction applications – Reference to modeling, simulation and analysis. In *2007 European Conference on Power Electronics and Applications*. <https://doi.org/10.1109/EPE.2007.4417646>

94. **Rong, S., Zhou, W., Hu, X., Geng, B., & Xiao, G. (2022)**. Railway power conditioner with energy storage system based on hybrid modular multilevel converter and its control strategy. *Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy*, 41(7), 10–24. <https://doi.org/10.12067/AETEE2108036>

95. **Kamel, T., Amor, P., Polater, N., Zhang, Y., Tian, Z., Hillmansen, S., & Tricoli, P. (2024)**. Development of a smart hybrid drive system with advanced logistics for railway applications. *International Journal of Hydrogen Energy*, 52(Part B), 559–576. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2023.01.293>

96. **Nerubatskyi, V. P. (2026)**. Problems and prospects for the implementation of brushless motors on traction rolling stock. *Zbirnyk naukovykh prats Ukrainskoho derzhavnogo universytetu zaliznychnoho transportu*, (215).

97. **Nerubatskyi, V. P. (2025)**. Analiz ekspluatatsiinoi nadiinosti bezkolektornykh tiahovykh dvyhuniv lokomotyviv [Analysis of operational reliability of brushless locomotive traction motors]. In *Tezy 3-i mizhnarodnoi naukovo-tekhnichnoi konferentsii "Prohresyvni tekhnologii zasobiv transportu"* (pp. 11–13). UkrDUZT. [in Ukrainian].

98. **Nerubatskyi, V. P. (2025)**. Investigation of the influence of external factors on the efficiency of locomotive traction motors. In *Materialy XIII mizhnarodnoi naukovo-praktychnoi konferentsii "Liudyna, suspilstvo, komunikatyvni tekhnologii"* (pp. 217–219). Serebniak T. K.

99. **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.

100. **Zhou, Z., Chen, Z., Spiriyagin, M., Aghaei, J., Cole, C., & Zhai, W. (2026)**. Modeling and dynamic characteristics analysis of the locomotive considering the electric transmission system. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 39, Article 100099. <https://doi.org/10.1016/j.cjme.2025.100099>

101. **Lukoševičius, V., Goolak, S., Derehuz, I., Neduzha, L., Keršys, A., & Dzerkelis, V. (2026)**. Conceptual basis of adaptation of a field-oriented control system for traction induction motors to the operating parameters of a locomotive. *Energies*, 19(2), Article 298. <https://doi.org/10.3390/en19020298>

102. **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 Ukrainskoho derzhavnogo universytetu zaliznychnoho transportu*, (214), 181–200. <https://doi.org/10.18664/1994-7852.214.2025.352044>

103. **Tran, C. D., Kuchar, M., & Nguyen, P. D. (2025)**. Improved speed sensorless control for induction motor drives using rotor flux angle estimation. *Electrical Engineering & Electromechanics*, (6), 93–97. <https://doi.org/10.20998/2074-272X.2025.6.12>

104. **Tran, C. D., Kuchar, M., Sotola, V., & Nguyen, P. D. (2026)**. Sensor fault diagnosis strategy based on rotor flux observers in three-phase induction motor drive. *Scientific Reports*, 16, Article 267. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-29381-9>

105. **Nerubatskyi, V. P. (2025)**. Ohliad tekhnolohichnykh rishen pidvyshchennia enerhoefektyvnosti roboty bezkolektornykh tiahovykh dvyhuniv lokomotyviv [Overview of technological solutions to increase the energy efficiency of brushless locomotive traction motors]. In *Zbirnyk materialiv XI mizhnarodnoi naukovo-tekhnichnoi konferentsii "Enerhetychnyi menedzhment: stan ta perspektyvy rozvytku - PEMS'2025"* (pp. 118–119). NTUU "KPI imeni Ihoria Sikorskoho". [in Ukrainian].

106. **Stiopkin, V. V., Smirnov, H. M., Naumenko, V. V., & Svobodin, O. O. (2023)**. Aktualnist systemy priamoho keruvannia momentom asynkhronnoho dvyhuna [Relevance of the direct torque control system of an induction motor]. In *Tezy dopovidei mizhnarodnoi naukovo-tekhnichnoi konferentsii "Informatsiini tekhnologii v metalurhii ta mashynobuduvanni - ITMM'2023"* (pp. 200–203). <https://doi.org/10.34185/1991-7848.itmm.2023.01.055> [in Ukrainian].

107. **Usha, S., Geetha, P., Geetha, A., Palanisamy, R., Thamizh Thentral, T. M., Mahato, B., Giri, N. C., & Alharbi, M. (2024)**. Performance enhancement of sensorless induction motor drive using modified direct torque control techniques for traction application. *Alexandria Engineering Journal*, 108, 518–538. <https://doi.org/10.1016/j.aej.2024.07.095>

108. **Plakhtiy, A., Nerubatskyi, V., & Tsybulnyk, V. (2019)**. Stabilization of voltages on capacitors of cells in modular multilevel inverters with space-vector PWM. *Visnyk NTU "KhPI"*. Seriya: *Elektrychni mashyny ta elektromekhanichne peretvorennia enerhii*, (20(1345)), 42–52. <https://doi.org/10.20998/2409-9295.2019.20.06>

109. **Goolak, S., & Kyrychenko, M. (2022)**. Thermal model of the output traction converter of an electric locomotive with induction motors. *Problemele Energeticii*

- Regionale*, (3(55)), 1–16. <https://doi.org/10.52254/1857-0070.2022.3-55.01>
110. Vijayan, V., & Ashok, S. (2015). High performance bi-directional Z-source inverter for locomotive drive application. *IET Electrical Systems in Transportation*, 5(4), 166–174. <https://doi.org/10.1049/iet-est.2014.0053>
111. Zhang, R., Lin, F., Yang, Z., Cao, H., & Liu, Y. (2017). A harmonic resonance suppression strategy for a high-speed railway traction power supply system with a SHE-PWM four-quadrant converter based on active-set secondary optimization. *Energies*, 10(10), Article 1567. <https://doi.org/10.3390/en10101567>
112. Kejian, S., Konstantinou, G., Jing, L., Mingli, W., & Agelidis, V. G. (2017). High performance control strategy for single-phase three-level neutral-point clamped traction four-quadrant converters. *IET Power Electronics*, 10(8), 884–893. <https://doi.org/10.1049/iet-pel.2016.0153>
113. Plakhtii, O. A., Nerubatskyi, V. P., Hordiienko, D. A., & Tsybulnyk, V. R. (2019). Analiz enerhoefektyvnosti tryrivnevnykh avtonomnykh invertoriv napruhy v rezhymy peremoduliatsii [Analysis of energy efficiency of three-level autonomous voltage inverters in overmodulation mode]. *Informatsiino-keruiuchi systemy na zaliznychnomu transporti*, (4), 3–12. <https://doi.org/10.18664/iksz.v0i4.177089> [in Ukrainian].
114. Plakhtii, O., Tsybulnyk, V., Nerubatskyi, V., & Mittsel, N. (2019). The analysis of modulation algorithms and electromagnetic processes in a five-level voltage source inverter with clamping diodes. In *2019 IEEE International Conference on Modern Electrical and Energy Systems (MEES). Proceedings* (pp. 294–297). IEEE. <https://doi.org/10.1109/MEES.2019.8896567>
115. Nerubatskyi, V. P., Plakhtii, O. A., Karpenko, N. P., Hordiienko, D. A., & Tsybulnyk, V. R. (2019). Analiz enerhetychnykh protsesiv u semyrivnevomu avtonomnomu invertori napruhy pry riznykh alhorytmakh moduliatsii [Analysis of energy processes in a seven-level autonomous voltage inverter under various modulation algorithms]. *Informatsiino-keruiuchi systemy na zaliznychnomu transporti*, 24(5), 8–18. <https://doi.org/10.18664/iksz.v24i5.181286>
116. Souad, R., & Zeroug, H. (2008). Comparison between direct torque control and vector control of a permanent magnet synchronous motor drive. In *2008 13th International Power Electronics and Motion Control Conference*. IEEE. <https://doi.org/10.1109/EPEPMC.2008.4635433>
117. Kolano, K. (2023). New method of vector control in PMSM motors. *IEEE Access*, 11, 43882–43890. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2023.3272273>
118. Riabov, I., Goolak, S., Kondratieva, L., & Overianova, L. (2023). Increasing the energy efficiency of the multi-motor traction electric drive of an electric locomotive for railway quarry transport. *Engineering Science and Technology, an International Journal*, 42, Article 101416. <https://doi.org/10.1016/j.jestch.2023.101416>
- Dubravyn, Yu., Tkachenko, V., & Spivak, O. (2021). Pidvyshchennia enerhetychnoi efektyvnosti tiahovoho elektropryvoda elektrovoza zminnoho strumu [Increasing the energy efficiency of the traction electric drive of an AC electric locomotive]. *Zbirnyk naukovykh prats DUIT. Seriya "Transportni systemy ta tekhnologii"*, (38), 36–52. <https://doi.org/10.32703/2617-9040-2021-38-36-4>
- Ma, J., Luo, C., Qiu, L., Liu, X., Xu, B., Shou, J., & Fang, Y. (2023). Recent advances in traction drive technology for rail transit. *Journal of Zhejiang University-SCIENCE A*, 24(3), Article 177–188. <https://doi.org/10.1631/jzus.A2200285>
- Liu, G., Wu, Y., Li, K., Wang, Y., & Li, C. Z. (2019). Development of high power SiC devices for rail traction power systems. *Journal of Crystal Growth*, 507, 442–452. <https://doi.org/10.1016/j.jcrysgro.2018.10.037>
- Nerubatskyi, V., Plakhtii, O., Hordiienko, D., & Khoruzhevskiy, H. (2020). Prospects for the development of power electronics by application of technologies for production of power semiconductor switches based on silicon carbide. *International Scientific Journal "Industry 4.0"*, 5(4), 170–173.
- Umegami, H., Harada, T., & Nakahara, K. (2023). Performance comparison of Si IGBT and SiC MOSFET power module driving IPMSM or IM under WLTC. *World Electric Vehicle Journal*, 14(4), Article 112. <https://doi.org/10.3390/wevj14040112>
- Abdalgader, I. A. S., Kivrak, S., & Özer, T. (2022). Power performance comparison of SiC-IGBT and Si-IGBT switches in a three-phase inverter for aircraft applications. *Micromachines*, 13(2), Article 313. <https://doi.org/10.3390/mi13020313>
- Poorfakhraei, A., Narimani, M., & Emadi, A. (2021). A review of modulation and control techniques for multilevel inverters in traction applications. *IEEE Access*, 9, Article 24187–24204. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3056612>
- Wang, X., Zhang, L., & Wu, P. (2021). Control and modeling of modular multi-level high voltage converter vector for rail trail traction. *International Core Journal of Engineering*, 7(5), 299–307. [https://doi.org/10.6919/ICJE.202105_7\(5\).0039](https://doi.org/10.6919/ICJE.202105_7(5).0039)
- Plakhtii, O., Nerubatskyi, V., Karpenko, N., Ananieva, O., Khoruzhevskiy, H., & Kavun, V. (2019). Studying a voltage stabilization algorithm in the cells of a modular six-level inverter. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 6(8 (102)), 19–27. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2019.185404>
- Ma, F., Xu, Q., He, Z., Tu, C., Shuai, Z., & Luo, A. (2016). A railway traction power conditioner using modular multilevel converter and its control strategy for high-speed railway system. *IEEE Transactions on Transportation Electrification*, 2(1), 96–109. <https://doi.org/10.1109/TTE.2016.2515164>
- Tanta, M., Barros, L. A. M., Pinto, J. G., Martins, A. P., & Afonso, J. L. (2020). Modular multilevel converter in electrified railway systems:

- Applications of rail static frequency converters and rail power conditioners. In *2020 International Young Engineers Forum (YEF-ECE)*. IEEE. <https://doi.org/10.1109/YEF-ECE49388.2020.9171814>
130. Szląg, A., Jefimowski, W., Maciołek, T., Nikitenko, A., Wiczorek, M., & Lewandowski, M. (2025). Hybrid energy storage system for regenerative braking utilization and peak power decrease in 3 kV DC railway electrification system. *Electronics*, *14*(9), Article 1752. <https://doi.org/10.3390/electronics14091752>
131. Kostenko, I., Nezlina, O., Malyuk, S., Lysenko, Y., & Popovich, D. (2024). Development of the traction system structure of a shunting diesel locomotive with a hybrid power supply scheme. *Transport Systems and Technologies*, *(43)*, 100–110. <https://doi.org/10.32703/2617-9059-2024-43-8>
132. Nerubatskyi, V. P. (2025). Monitorynh tekhnichnoho stanu bezkolektoynykh tiahovykh dvyhuniv zavdiaky zaluchenniu tsyfrovyykh tekhnolohii siohodennia [Monitoring of the technical condition of brushless traction motors through the involvement of modern digital technologies]. In *Tezy dopovidei 6-i mizhnarodnoi naukovo-tekhnichnoi konferentsii "Intelektualni transportni tekhnolohii"* (pp. 81–83). UkrDUZT.
133. Nerubatskyi, V. P. (2025). Initsiiuvannia realizatsii prykladnoho doslidnytskoho proiektu z udoskonalennia enerhoefektyvnosti tiahovykh elektrychnykh dvyhuniv lokomotyviv z urahuvanniam rezhymiv funktsionuvannia tiahovykh peretvoriuvachiv [Initiating the implementation of an applied research project to improve the energy efficiency of locomotive traction electric motors taking into account the operating modes of traction converters]. In *Zbirka naukovykh tez XIV naukovoї konferentsii "Naukovi pidsumky 2025 roku"* (p. 29). PP "Tekhnolohichniy Tsentr".
134. Yingming, T., Kenan, D., Jianfeng, Q., Li, F., & Yi, C. (2024). A learning observer-based control strategy for PMSM with position sensor fault in railway. *Control Engineering Practice*, *142* concert, Article 105705. <https://doi.org/10.1016/j.conengprac.2023.105705>
135. Xie, Q., Xu, Q., Luo, L., Tu, Y., & Song, W. (2025). Sensorless induction motor control based on an improved full-order state observer. *Energies*, *18*(16), Article 4374. <https://doi.org/10.3390/en18164374>
136. Qiu, W., Zhao, X., Tyrrell, A., Perinpanayagam, S., Niu, S., & Wen, G. (2024). Application of artificial intelligence-based technique in electric motors: A review. *IEEE Transactions on Power Electronics*, *39*(10), 13543–13568. <https://doi.org/10.1109/TPEL.2024.3410958>
137. Huang, Z., Gong, J., Xiao, X., Gao, Y., Xia, Y., Wheeler, P., & Ji, B. (2025). Artificial intelligence and digital twin technologies for power converter control in transportation applications: A review. *IET Power Electronics*, *18*(1), Article e70013. <https://doi.org/10.1049/pel2.70013>

Нерубацький В. П. Дослідження методів і засобів керування безколекторними тяговими двигунами локомотивів на основі сучасних силових перетворювачів.

Анотація. Об'єктом дослідження є електромеханічні та енергетичні процеси перетворення і керування енергією в безколекторних тягових електроприводах локомотивів під час реалізації режимів тяги і рекуперативного гальмування. У роботі розглянуто підходи щодо підвищення енергоефективності та експлуатаційної надійності тягових систем через обґрунтований вибір структурних конфігурацій силових перетворювачів і сучасних методів керування електромагнітним моментом тягових двигунів.

Узагальнено конструктивні та енергетичні особливості асинхронних двигунів і синхронних двигунів із постійними магнітами як основних об'єктів керування у складі безколекторного електропривода локомотива. Визначено, що функціонування тягових систем у залізничних умовах має широкий діапазон швидкостей, значні коливання навантаження та необхідність забезпечення двонапрямого енергетичного обміну з тяговою мережею.

Систематизовано основні режими роботи тягового електропривода, зокрема тяговий режим і режим електричного гальмування, а також встановлено структурні вимоги щодо їх реалізації. Узагальнено типові конфігурації силових перетворювальних комплексів електровозів постійного та змінного струму, зокрема рішення з проміжною ланкою постійного струму, автономними інверторами напруги, багаторівневими перетворювачами, проміжними каскадами перетворення енергії та комбінованими схемами з накопичувальними системами.

Показано, що ефективність рекуперативного гальмування і стабільність енергетичних процесів визначені переважно можливостями двонапрямого перетворення енергії, параметрами проміжної ланки та узгодженням електропривода з характеристиками контактної мережі. Встановлено, що застосування сучасних методів векторного і прямого керування моментом дає змогу забезпечити високі динамічні показники тягового електропривода, точність регулювання моменту і зниження енергетичних втрат у силових перетворювачах.

Перспективність розглянутих підходів пояснено інтеграцією напівпровідникових перетворювальних систем нового покоління, використанням накопичувачів енергії та адаптивних

алгоритмів керування, здатних функціонувати в умовах змінних експлуатаційних режимів. Використання результатів оглядового дослідження буде корисним для проектування та модернізації систем керування тяговими електроприводами локомотивів, оптимізації режиму рекуперативного гальмування і забезпеченні надійної роботи локомотивів у широкому діапазоні навантажень.

Ключові слова: *безколекторні тягові двигуни, тяговий привод, локомотив, силові перетворювачі, автономний інвертор напруги, рекуперативне гальмування, методи керування, багаторівневі інвертори.*

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 26.03.26

Стаття прийнята до друку після рецензування 17.04.26

Стаття опублікована (оприлюднена) 29.05.26

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

РИБАЛЬЧЕНКО Л. І., к.т.н., доцент
(Український державний університет залізничного транспорту)

Трансформація управління вантажопотоками на залізниці на основі цифрових платформ

Розглянуто проблеми управління вантажопотоками на залізничному транспорті з акцентом на цифровізацію процесів і впровадження блокчейн-технологій. Запропоновано оптимізаційну модель, яка враховує вартість перевезень, час доставлення, пропускну спроможність ділянок та ймовірність затримок. Проаналізовано ефективність застосування цифрових платформ і автоматизованих систем для зниження витрат і покращення прозорості логістики. У статті надано практичні рекомендації щодо інтеграції блокчейну та цифрових рішень у систему управління вантажопотоками. Результати сприяють підвищенню ефективності залізничної логістики.

Ключові слова: управління вантажопотоками, цифровізація залізничної логістики, блокчейн-технології в перевезеннях, оптимізація перевезень на залізничному транспорті, автоматизація логістичних процесів, цифрові платформи для залізниць, математичні моделі перевезень, прозорість логістичних операцій, зниження витрат на перевезення, інтеграція цифрових рішень у залізничний транспорт. багатофакторним завданням, що потребує постійного вдосконалення.

Вступ.

Залізничні вантажні перевезення є основною ланкою транспортної інфраструктури, що забезпечує безперервний рух товаропотоків як у межах країн, так і на міжнародному рівні. Важливою складовою цього процесу є контроль за вантажопотоками, який впливає на своєчасність, безпеку та економічну ефективність перевезень. Зі зростанням обсягів залізничних перевезень і розвитком світової логістики виникає необхідність впровадження сучасних технологій, здатних автоматизувати і оптимізувати управління вантажопотоками.

Останніми роками залізничний сектор активно впроваджує цифрові технології, серед яких головну роль відіграють цифрові платформи та блокчейн. Використання цих інструментів дає змогу покращити моніторинг перевезень, знизити витрати, мінімізувати ризики людського фактора та забезпечити прозорість усіх операцій. Блокчейн-технології особливо актуальні для обліку вантажів, контролю за логістичними процесами та управління документальним супроводом перевезень.

У статті розглянуто сучасні підходи щодо використання цифрових платформ і блокчейну в управлінні вантажопотоками на залізничному транспорті. Особливу увагу приділено аналізу основних факторів, що впливають на ефективність впровадження цих технологій, а також перспективам їхнього подальшого розвитку в Україні та світі.

Постановка проблеми дослідження.

Залізничний транспорт є важливою ланкою у сфері вантажних перевезень, забезпечуючи транспортування значних обсягів товарів на великі відстані з високим рівнем надійності та економічної ефективності. Водночас управління вантажопотоками на залізничному транспорті залишається складним

© РИБАЛЬЧЕНКО Л. І., 2026

Попри наявність значної кількості досліджень у сфері логістики та цифровізації транспорту, недостатньо опрацьованими залишаються питання комплексної інтеграції цифрових платформ і блокчейн-технологій у єдину систему управління вантажопотоками, а також оцінювання їхнього синергетичного ефекту. Зокрема, потребують подальшого дослідження:

- узгодження роботи різномірних інформаційних систем у межах залізничної інфраструктури;
- забезпечення безперервного обміну достовірними даними між усіма учасниками логістичного процесу;
- адаптація існуючих бізнес-процесів до умов цифрової трансформації;
- оцінювання економічної доцільності впровадження інноваційних технологій.

Однією з головних проблем є недостатній рівень автоматизації процесів контролю та координації перевезень, що призводить до затримок, неефективного використання рухомого складу і зростання експлуатаційних витрат.

У сучасних умовах цифрові технології відіграють дедалі важливішу роль у модернізації логістичних процесів. Використання цифрових платформ забезпечує централізоване управління перевезеннями, автоматизований збір даних і моніторинг вагонопотоків у реальному часі. Водночас впровадження блокчейн-технологій відкриває можливості для підвищення прозорості операцій, захисту інформації та оптимізації документообігу.

Проте, незважаючи на значний потенціал цифровізації, її практичне впровадження у сфері залізничних вантажних перевезень стримуване низкою факторів, серед яких технічна несумісність інформаційних систем, складність інтеграції з

ІНФОРМАЦІЙНО-КЕРУЮЧІ СИСТЕМИ НА ЗАЛІЗНИЧНОМУ ТРАНСПОРТІ

наявною інфраструктурою, значні фінансові витрати і недосконалість нормативно-правового забезпечення.

Отже, актуальність дослідження зумовлена необхідністю розв'язання невирішених аспектів інтеграції цифрових платформ і блокчейн-технологій у систему управління вантажопотоками з метою підвищення ефективності функціонування залізничного транспорту.

Аналіз останніх досліджень і публікацій.

У сучасній науковій літературі питання цифровізації залізничного транспорту і управління вантажопотоками розглядають у межах кількох взаємопов'язаних напрямів: впровадження цифрових платформ, використання технологій великих даних і штучного інтелекту, розвиток концепції «цифрового двійника», а також застосування блокчейн-технологій у логістичних процесах.

Значна кількість досліджень присвячена загальним питанням цифрової трансформації транспортної галузі. Зокрема, у роботах С. Сарпа, М. Кузлу, В. Йованович та ін. розглянуто вплив цифровізації, Інтернету речей (IoT), штучного інтелекту і концепції Industry 4.0/5.0 на розвиток залізничних систем. Автори зазначають, що інтеграція цифрових технологій допомагає підвищити ефективність експлуатації, безпеку та якість транспортних послуг, однак процес цифровізації стримує застаріла інфраструктура і недостатній рівень інвестицій [1].

Окремий напрям досліджень пов'язаний із використанням цифрових технологій для управління інфраструктурою і технічним обслуговуванням. Так, М. Родрігес-Ернандес, А. Креспо-Маркес, А. Санчес-Ергедас і В. Гонсалес-Пріда аналізують роль великих даних, IoT і аналітичних систем у підвищенні ефективності управління активами залізничного транспорту. У їхніх роботах доведено, що цифровізація сприяє переходу до предиктивного обслуговування та покращує якість управлінських рішень, однак потребує комплексного узгодження технологічних і організаційних змін [2].

Важливе місце в сучасних дослідженнях займають цифрові платформи як інструмент інтеграції логістичних процесів. У роботі [3] розглянуто досвід впровадження цифрових рішень у залізничній логістиці, визначено їхню роль у забезпеченні взаємодії між учасниками транспортного процесу та підвищенні ефективності обробки вантажів. Встановлено, що платформи дають змогу інтегрувати інформаційні потоки та оптимізувати управління перевезеннями, однак їхня ефективність залежить від рівня цифрової зрілості підприємств [3].

У зарубіжних дослідженнях значну увагу приділено концепції «цифрового двійника» та інтелектуальних транспортних систем. Зокрема, у роботах, присвячених аналізу цифрових двійників, доведено, що їх використання забезпечує можливість моделювання процесів у реальному часі, прогнозування технічного стану інфраструктури та

оптимізації вантажопотоків. Водночас основними проблемами залишаються складність інтеграції даних, високі витрати на впровадження та питання кібербезпеки [4].

Загальні тенденції цифровізації логістики відображені також у роботах, присвячених розвитку вантажних перевезень і ланцюгів постачання. У них зазначено, що цифрові технології виконують три основні функції: забезпечення зв'язності, координації і створення доданої вартості в логістичних системах. При цьому особливу увагу приділено інтеграції інформаційних потоків і підвищенню прозорості операцій [5].

Суттєвий науковий інтерес становлять дослідження, присвячені застосуванню блокчейн-технологій у залізничному транспорті. Зокрема, у роботі [6] доведено, що блокчейн може бути ефективно використаний для забезпечення надійного обміну даними, автоматизації документообігу та підвищення прозорості логістичних операцій. Автори виділяють перспективні напрями застосування цієї технології, зокрема у сфері міжнародних перевезень, управління ланцюгами постачання та координації між різними учасниками ринку [6].

Крім того, у низці досліджень розглянуто економічний ефект від впровадження цифрових технологій у залізничному транспорті. Зокрема, доведено, що використання RFID, автоматизованих систем і аналітики даних допомагає знизити витрати, підвищити точність обліку вантажів і покращити конкурентоспроможність залізничних перевезень [5].

Водночас аналіз наукових джерел свідчить, що більшість досліджень зосереджена на окремих технологіях або аспектах цифровізації. Комплексний підхід щодо інтеграції цифрових платформ, блокчейн-технологій, аналітики даних та інтелектуальних систем у єдину систему управління вантажопотоками залишається недостатньо розробленим. Також недостатньо дослідженими є питання оцінювання економічної ефективності їх спільного використання і адаптації цих рішень до умов функціонування національних залізничних систем.

Отже, існує потреба у проведенні подальших досліджень, спрямованих на розроблення інтегрованих підходів щодо цифровізації управління вантажопотоками, що і визначає актуальність цієї роботи.

Визначення мети та завдання дослідження.

Мета дослідження полягає в підвищенні ефективності управління вантажопотоками на залізничному транспорті через впровадження цифрових платформ і блокчейн-технологій. Це включає аналіз можливостей використання цифрових інструментів для покращення контролю за перевезеннями, зменшення затримок, оптимізації логістичних процесів і підвищення прозорості операцій.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі завдання:

ІНФОРМАЦІЙНО-КЕРУЮЧІ СИСТЕМИ НА ЗАЛІЗНИЧНОМУ ТРАНСПОРТІ

- дослідити сучасний стан цифровізації у сфері залізничних вантажних перевезень і проаналізувати існуючі проблеми, пов'язані з управлінням вантажопотоками;

- розглянути можливості використання блокчейн-технологій для підвищення прозорості логістичних операцій, зменшення паперового документообігу;

- розробити концепцію інтеграції цифрових платформ у систему управління вантажопотоками, ураховуючи вимоги залізничних операторів і регуляторні обмеження;

- визначити основні перешкоди для цифровізації управління вантажопотоками і розробити рекомендації щодо їх подолання.

Виконання цих завдань сприятиме вдосконаленню логістичних процесів у сфері залізничних перевезень, забезпеченню більшої ефективності та конкурентоспроможності галузі за рахунок використання сучасних цифрових рішень.

Виклад основного матеріалу.

Залізничний транспорт є одним із головних елементів глобальної логістичної системи, що забезпечує перевезення значних обсягів вантажів на далекі відстані. Водночас традиційні методи управління вантажопотоками все ще мають певні недоліки, зокрема складні процедури документообігу, затримки в передаванні даних і недостатню координацію між учасниками перевізного процесу.

Для підвищення ефективності залізничної логістики важливо використовувати оптимізаційні математичні моделі, які дають змогу ухвалювати рішення в режимі реального часу, розподіляти вагони відповідно до потреб ринку і мінімізувати витрати [8].

Останніми роками активно розвивається цифровізація галузі, спрямована на покращення ефективності перевезень. Впроваджують автоматизовані системи моніторингу рухомого складу, електронний документообіг, а також цифрові платформи для оптимізації логістичних процесів [10]. Водночас існує потреба в більш досконалих підходах щодо контролю за вантажопотоками, які зменшували б вплив людського фактора і підвищували оперативність обробки інформації.

Для забезпечення ефективного управління вантажопотоками на залізничному транспорті важливо враховувати різні фактори, які впливають на процес перевезення. Це включає вартість транспортування, час доставлення, доступність рухомого складу, можливі затримки на маршрутах. Розроблення оптимізаційної моделі, яка інтегрує ці параметри, дасть змогу не лише мінімізувати витрати, але і підвищити надійність і швидкість перевезень.

У цьому контексті доцільно розробити математичну модель, яка враховує як економічні, так і технічні аспекти процесу перевезення вантажів. Водночас ефективність такої моделі значною мірою залежить від якості, повноти і актуальності вхідних даних. Саме тому доцільно використовувати блокчейн-технології, які забезпечують надійне

зберігання, передавання та верифікацію інформації про вантажопотоки в режимі реального часу [7, 9].

Інтеграція блокчейну дає змогу формувати достовірні значення параметрів моделі, що, зокрема, підвищує точність оптимізаційних розрахунків і обґрунтованість управлінських рішень.

Для ефективного управління вантажопотоками необхідно розробити оптимізаційну модель, яка враховує такі параметри:

x_{ij} – кількість вагонів, які необхідно перевезти з пункту i у пункт j ;

c_{ij} – вартість перевезення одного вагона між пунктами i та j ;

t_{ij} – час перевезення між пунктами i та j ;

d_j – попит на вагони в пункті j ;

s_i – доступна кількість вагонів у пункті i ;

p_{ij} – імовірність затримки на маршруті $i \rightarrow j$.

Математична модель може бути сформульована як задача мінімізації загальних витрат на перевезення, ураховуючи обмеження пропускної спроможності

$$\min \sum_i \sum_j c_{ij} x_{ij}$$

(1)

із дотриманням вказаних нижче умов.

Обмеження доступності вагонів у відправних пунктах:

$$\sum_j x_{ij} \leq s_i$$

(2)

якщо $\forall i$.

Баланс попиту в пунктах призначення:

$$\sum_i x_{ij} \geq d_j$$

(3)

якщо $\forall j$.

Обмеження пропускної спроможності залізничних ділянок:

$$x_{ij} \leq C_{ij}$$

(4)

якщо $\forall (i, j)$,

де C_{ij} – максимальна пропускна спроможність ділянки.

Модель також може бути розширена на випадок невизначеності, ураховуючи ймовірність затримки на маршруті $i \rightarrow j$. Оптимізація перевезень відбувається через мінімізацію очікуваних затримок:

$$\min \sum_i \sum_j p_{ij} t_{ij} x_{ij} \quad (5)$$

Ця модель дає змогу визначити оптимальний розподіл вагонів, знижуючи транспортні витрати і скорочуючи час доставлення.

Слід зазначити, що практична реалізація запропонованої моделі потребує наявності достовірних і синхронізованих даних про переміщення вагонів, вартість перевезень, час доставлення та можливі затримки. У традиційних системах такі дані часто є фрагментованими або застарілими, що знижує ефективність оптимізаційних рішень.

Використання блокчейн-технологій допомагає усунути ці недоліки, оскільки всі дані про операції з вантажами фіксують у розподіленому реєстрі та є доступними для всіх учасників логістичного процесу. Це забезпечує актуальність параметрів моделі та дає змогу застосовувати її в режимі реального часу.

Блокчейн-технології є перспективним рішенням для удосконалення управління вантажопотоками на залізничному транспорті. Основні переваги блокчейну включають прозорість і незмінність даних – усі транзакції записують у розподіленому реєстрі, що унеможливає фальсифікацію або зміну інформації.

Автоматизація процесів – смарт-контракти дають змогу автоматизувати виконання угод між перевізниками, операторами терміналів та іншими учасниками логістичного ланцюга.

Безпека та зниження ризиків шахрайства – децентралізований характер блокчейну гарантує, що дані про вантажі, маршрути та учасників перевезення залишаються захищеними від несанкціонованого доступу.

Запровадження блокчейну допоможе зменшити адміністративні витрати, скоротити час перевірки вантажних документів і покращити координацію між залізничними адміністраціями різних країн.

Блокчейн є потужним інструментом для цифровізації залізничних перевезень, оскільки він дає змогу автоматизувати документообіг, зменшити

ризик шахрайства і покращити координацію між операторами.

Для забезпечення зв'язку між оптимізаційною моделлю та інформаційною інфраструктурою доцільно інтегрувати блокчейн-систему у процес управління вантажопотоками. У цьому випадку блокчейн є джерелом достовірних даних для параметрів моделі та інструментом реалізації її результатів.

Кожен вагон k має унікальний цифровий ідентифікатор ID_k , а інформацію про його переміщення, стан і виконання перевезень автоматично фіксують у блокчейн-мережі. Отримані дані використовують для оновлення параметрів x_{ij} , t_{ij} , p_{ij} у режимі реального часу, щоб адаптувати оптимізаційну модель до поточних умов функціонування транспортної системи.

Запис у блокчейні можна подати як

$$H_k = H(ID_k, T_k, L_k, P_k) \quad (6)$$

де H_k – хеш-запис у блокчейні;

T_k – час прибуття вагона на станцію;

L_k – місцезнаходження вагона;

P_k – параметри вантажу.

Це дає змогу в режимі реального часу відстежувати переміщення вагонів, зменшуючи кількість людських помилок і покращити контроль за логістикою.

Крім того, результати оптимізаційної моделі можуть бути реалізовані за допомогою смарт-контрактів, які автоматично виконують розподіл вагонів відповідно до знайденого оптимального рішення. Це допомагає мінімізувати вплив людського фактора, скоротити час ухвалення рішень і підвищити ефективність управління вантажопотоками.

Інтеграція цифрових платформ у систему управління вантажопотоками

Цифрові платформи, що використовують елементи штучного інтелекту і великих даних (Big Data), відкривають нові можливості для прогнозування та оптимізації перевезень [11].

Вони дають змогу:

- аналізувати поточне завантаження залізничної мережі та прогнозувати можливі затримки;

- автоматично розподіляти вагони відповідно до потреб ринку та наявності вільного рухомого складу;

ІНФОРМАЦІЙНО-КЕРУЮЧІ СИСТЕМИ НА ЗАЛІЗНИЧНОМУ ТРАНСПОРТІ

- контролювати технічний стан вагонів і локомотивів у режимі реального часу.

Одним із успішних прикладів є європейська ініціатива Rail Freight Digital Platform, яка об'єднує перевізників, вантажовласників та інфраструктурні компанії для спрощення управління логістичними операціями.

Інтелектуальні транспортні системи (ITS) допомагають прогнозувати навантаження на залізничну мережу, аналізуючи історичні дані та поточні умови. Прогнозування обсягів вантажопотоків можна здійснити за допомогою регресійної моделі

$$V_t = \alpha + \beta_1 V_{t-1} + \beta_2 P_t + \beta_3 T_t + \varepsilon_t \quad (7)$$

де V_t – прогнозований обсяг перевезень на момент часу t ;

V_{t-1} – обсяг перевезень у попередньому періоді;

P_t – ціна на залізничні перевезення;

T_t – середня тривалість перевезень;

ε_t – випадкова помилка прогнозу.

Використання таких моделей дає змогу залізничним компаніям більш ефективно розподіляти ресурси та уникати перевантаження на окремих ділянках.

Ефективність впровадження цифрових технологій у залізничній логістиці доцільно розглядати як комплексний результат змін у процесах управління вантажопотоками, інформаційному забезпеченні та організації перевезень.

На відміну від підходів, що базовані виключно на узагальнених статистичних показниках, у цій роботі ефективність цифровізації пропонується оцінювати за сукупністю якісних змін, що виникають у результаті інтеграції цифрових платформ і блокчейн-технологій.

Зокрема, впровадження цифрових інструментів забезпечує:

- підвищення оперативності обробки інформації завдяки переходу до електронного документообігу;

- покращення координації між учасниками перевізного процесу за рахунок єдиного інформаційного середовища;

- зниження впливу людського фактора для ухвалення рішень;

- підвищення прозорості логістичних операцій і достовірності даних;

- можливість адаптації управлінських рішень у режимі реального часу.

Важливою особливістю є те, що використання блокчейн-технологій дає змогу забезпечити цілісність і синхронізацію даних, що безпосередньо впливає на якість параметрів оптимізаційної моделі. Це у свою чергу сприяє підвищенню обґрунтованості рішень про розподіл вагонів і планування перевезень.

Отже, ефективність цифровізації проявляється не лише в можливому зниженні витрат або скороченні часу виконання операцій, але і в підвищенні загальної керованості транспортної системи, її адаптивності до змін зовнішнього середовища та здатності до інтеграції з іншими елементами логістичної інфраструктури.

Запропонований підхід дає змогу розглядати цифровізацію як фактор підвищення системної ефективності залізничних перевезень, що забезпечує довгострокові переваги для всіх учасників транспортного процесу.

Основні перешкоди та рекомендації щодо їх подолання

Незважаючи на переваги цифрових технологій, існують певні перешкоди для їх впровадження:

- висока вартість інтеграції блокчейн-систем у залізничну інфраструктуру;

- необхідність узгодження технологічних стандартів між різними залізничними адміністраціями;

- відсутність єдиної стратегії цифрової трансформації в багатьох країнах.

Для подолання цих аспектів важливо:

- розробити єдині цифрові стандарти обміну даними між залізничними операторами;

- залучити державні інвестиції та міжнародні гранти для підтримки цифровізації залізничної галузі;

- сприяти активній співпраці між залізничними адміністраціями з метою впровадження блокчейн-технологій і цифрових платформ.

Висновки.

У роботі визначено основні напрями цифровізації залізничного транспорту, зокрема впровадження цифрових платформ і блокчейн-технологій, що забезпечують автоматизацію збору та обробки даних, покращення моніторингу вантажопотоків і вдосконалення управління документацією.

Запропоновано підхід щодо управління вантажопотоками на основі оптимізаційної математичної моделі, яка враховує економічні та технічні параметри перевізного процесу. Також обґрунтовано доцільність використання блокчейн-технологій як інструменту забезпечення достовірності та актуальності даних, необхідних для функціонування моделі.

Показано, що інтеграція цифрових технологій у систему управління вантажопотоками створює передумови для підвищення прозорості логістичних процесів, покращення координації між учасниками

ІНФОРМАЦІЙНО-КЕРУЮЧІ СИСТЕМИ НА ЗАЛІЗНИЧНОМУ ТРАНСПОРТІ

перевезень і оперативності ухвалення управлінських рішень.

Подальші дослідження доцільно спрямувати на вдосконалення методів прогнозування вантажопотоків, а також інтеграцію інструментів штучного інтелекту для автоматизації планування залізничних перевезень.

Список використаних джерел

- Sarp S., Kuzlu M., Jovanovic V. Digitalization of railway transportation through AI-powered services: digital twin trains. *European Transport Research Review*. 2024. Vol. 16. Article 58. URL: <https://doi.org/10.1186/s12544-024-00679-5> (date of access: 20.01.2026).
- Rodríguez-Hernández M., Crespo-Márquez A., Sánchez-Herguedas A., González-Prida V. Big data analytics in railway systems: A review. *Infrastructures*. 2025. Vol. 10 (4). P. 96. URL: <https://doi.org/10.3390/infrastructures10040096> (date of access: 18.01.2026).
- Revolutionizing railway systems: A systematic review of digital twin technologies. *High-Speed Railway*. 2025. Vol. 3 (3). P. 238–250. URL: <https://doi.org/10.1016/j.hspr.2025.05.005> (date of access: 25.01.2026).
- Kuperberg M. Scaling a blockchain-based railway control system prototype for mainline railways. 2021. URL: <https://arxiv.org/abs/2103.08304> (date of access: 26.01.2026).
- RFID technology and its effects on improving technological processes at the Čierna nad Tisou station. *Transportation Research Procedia*. 2021. Vol. 55. P. 466–474. DOI: 10.1016/j.trpro.2021.07.010 (date of access: 25.01.2026).
- Krmac E., Djordjevic B. Digital twins for railway sector: current state and future directions. *IEEE Access*. 2024. URL: <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2024.3439471> (date of access: 28.01.2026).
- Tardivo A., Sánchez Martín C. A study of blockchain adoption in the rail sector. *Transportation Research Procedia*. 2023. Vol. 72. P. 1396–1403. <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2023.11.603> (date of access: 20.01.2026).
- Li Z. Artificial intelligence in railway infrastructure: current research, challenges, and future opportunities. *Intelligent Transportation Infrastructure*. 2023. <https://doi.org/10.1093/iti/liad016> (date of access: 20.01.2026).
- Wang C., Wang X. A blockchain-based trusted sharing method for railway transportation BIM data. *Blockchain: Research and Applications*. 2025. <https://doi.org/10.1016/j.bcr.2024.100273> (date of access: 22.01.2026).
- Rodríguez-Hernández M. et al. Digitalization as an enabler in railway maintenance Infrastructures. 2025. Vol. 10 (4). <https://doi.org/10.3390/infrastructures10040096> (date of access: 18.01.2026).
- Рибальченко Л. І. Використання Big Data для прийняття управлінських рішень у сфері експлуатаційної діяльності залізничного транспорту. *Наука і техніка сьогодні*. 2025. № 2 (43). С. 1491–1501.

References

- Sarp, S., Kuzlu, M., & Jovanovic, V. (2024). Digitalization of railway transportation through AI-powered services: Digital twin trains. *European Transport Research Review*, 16, Article 58. <https://doi.org/10.1186/s12544-024-00679-5>
- Rodríguez-Hernández, M., Crespo-Márquez, A., Sánchez-Herguedas, A., & González-Prida, V. (2025). Big data analytics in railway systems: A review. *Infrastructures*, 10(4), Article 96. <https://doi.org/10.3390/infrastructures10040096>
- Revolutionizing railway systems: A systematic review of digital twin technologies. (2025). *High-Speed Railway*, 3(3), 238–250. <https://doi.org/10.1016/j.hspr.2025.05.005>
- Kuperberg, M. (2021). *Scaling a blockchain-based railway control system prototype for mainline railways*. arXiv. <https://arxiv.org/abs/2103.08304>
- RFID technology and its effects on improving technological processes at the Čierna nad Tisou station. (2021). *Transportation Research Procedia*, 55, 466–474. <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2021.07.010>
- Krmac, E., & Djordjevic, B. (2024). Digital twins for railway sector: Current state and future directions. *IEEE Access*, 12, 111164–111183. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2024.3439471>
- Tardivo, A., & Sánchez Martín, C. (2023). A study of blockchain adoption in the rail sector. *Transportation Research Procedia*, 72, 1396–1403. <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2023.11.603>
- Li, Z. (2023). Artificial intelligence in railway infrastructure: Current research, challenges, and future opportunities. *Intelligent Transportation Infrastructure*, 2, Article liad016. <https://doi.org/10.1093/iti/liad016>
- Wang, C., & Wang, X. (2025). A blockchain-based trusted sharing method for railway transportation BIM data. *Blockchain: Research and Applications*, 6(2), Article

100273. <https://doi.org/10.1016/j.bcra.2024.100273>
10. Rodríguez-Hernández, M., Crespo-Márquez, A., Sánchez-Herguedas, A., & González-Prida, V. (2025). Digitalization as an enabler in railway maintenance: A review from “The International Union of Railways Asset Management Framework” perspective. *Infrastructures*, 10(4), Article 96. <https://doi.org/10.3390/infrastructures10040096>
11. Rybalchenko, L. I. (2025). Vykorystannia Big Data dlia pryniattia upravlinskykh rishen u sferi ekspluatatsiinoi diialnosti zaliznychnoho transportu [The use of Big Data for making managerial decisions in the field of operational activity of railway transport]. *Nauka i tekhnika sohodonni* [Science and Technology Today], (2(43)), 1491–1501.

Rybalchenko Liliia

TRANSFORMATION OF FREIGHT FLOW MANAGEMENT IN RAILWAY TRANSPORT BASED ON DIGITAL PLATFORMS

Abstract. Rail freight transportation plays a critical role in ensuring the smooth flow of goods both domestically and internationally. A key component of this process is cargo flow management, which directly influences the timeliness, safety, and economic efficiency of transportation. With the growing volume of railway freight and the development of global logistics, there is an increasing need to implement advanced technologies to automate and optimize cargo management. In recent years, the railway sector has actively adopted digital technologies, including digital platforms and blockchain, to improve monitoring, reduce costs, minimize human error, and enhance operational transparency. Blockchain technologies, in particular, are crucial for cargo accounting, logistics process control, and document management.

This paper explores the modern approaches to the use of digital platforms and blockchain in railway freight flow management. It analyzes the key factors influencing the effectiveness of implementing these technologies and examines the prospects for their further development both in Ukraine and globally. The research addresses the challenges of insufficient automation in the control and coordination of railway transportation, which leads to delays, inefficient use of rolling stock, and increased operational costs.

Digital platforms offer centralized management, automated data collection, and real-time monitoring of freight flows, while blockchain can significantly improve

transparency, reduce the risk of fraud, and streamline documentation. Despite these advantages, the widespread implementation of these technologies faces challenges such as the technical compatibility of various information systems, the need for integration with existing infrastructure, high implementation costs, and the adaptation of legal frameworks.

The aim of the research is to improve the efficiency of cargo flow management on railways through the use of digital platforms and blockchain. The study analyzes the potential of digital tools to enhance monitoring, reduce delays, optimize logistics, and increase operational transparency. By examining case studies and identifying obstacles, the research offers recommendations for overcoming barriers and integrating these innovations into railway transportation systems, contributing to the overall modernization of logistics processes and improving the competitiveness of the sector.

Keywords: freight flow management, digitization of railway logistics, blockchain technologies in transportation, optimization of rail transportation, automation of logistics processes, digital platforms for railways, mathematical models of transportation, transparency of logistics operations, reduction of transportation costs, integration of digital solutions into rail transportation.

Рибальченко Лілія Ігорівна, кандидат технічних наук, доцент кафедри управління експлуатаційною роботою, Український державний університет залізничного транспорту, Харків, Україна. E-mail: rybalchenko@kart.edu.ua. ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-3585-624X>.

Rybalchenko Liliia, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Operational work management, Ukrainian State University of Railway Transport, Kharkiv, Ukraine. E-mail: rybalchenko@kart.edu.ua. ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-3585-624X>.

Стаття надійшла 06.04.26

Стаття прийнята до друку після рецензування 01.05.26

Стаття опублікована (оприлюднена) 29.05.26

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

СЕМЕНЕНКО Ю. О., к.т.н., доцент

(Український державний університет залізничного транспорту)

СИСОЄВ Ю. О., д.т.н., професор

СЕМЕНЕНКО О. Д., асистент

СТЕПАНЕНКО Д. Р., старший викладач

СОРОКА А. С., студентка

ШИРОКИЙ Ю. В., к.т.н., доцент

(Національний аерокосмічний університет «Харківський авіаційний інститут»)

Енергоефективні алгоритми обробки сенсорної інформації для наземних роботизованих систем різного призначення

У статті розглянуто застосування методів одночасної локалізації та побудови карти (SLAM) для забезпечення автономної навігації мобільних роботів у невідомому середовищі. Актуальність дослідження зумовлена потребою у створенні високоефективних алгоритмів обробки сенсорної інформації для автономних мобільних платформ, що функціонують в умовах обмежених обчислювальних ресурсів і відсутності зовнішньої навігаційної інфраструктури. Особливої ваги такі задачі набувають для українських реалій, зокрема розроблення наземних роботизованих систем для обстеження територій, моніторингу інфраструктури, розмінування, роботи в зоні надзвичайних ситуацій і на промислових об'єктах. Проаналізовано підходи щодо фільтрації даних лазерного далекоміра в навігаційних системах мобільних роботів. Традиційно в задачах SLAM застосовують методи на основі фільтра Калмана і його модифікацій — розширений фільтр Калмана (EKF) і ненасичений фільтр Калмана (UKF). Однак алгоритм EKF потребує лінеаризації нелінійних моделей, що призводить до втрати точності, тоді як UKF забезпечує кращу узгодженість оцінок, але має підвищену обчислювальну складність. Це обмежує їхню ефективність для автономних роботів із обмеженими апаратними ресурсами.

Альтернативою є алгоритм фільтрації GP-RTSS, побудований на основі гаусових процесів, який не потребує процедури лінеаризації, чисельного інтегрування та явного прогнозування вибірки моделі. Такий підхід забезпечує вищу точність оцінювання стану та адаптивність до різних типів динамічних систем. Водночас суттєвим обмеженням GP-RTSS є значні обчислювальні витрати, пов'язані з обчисленням яdroвої функції.

У роботі досліджено модифікацію фільтра DIS RTSS, що реалізує схему розподілених обчислень у структурі GP-RTSS із метою зменшення часу обробки даних і обсягу пам'яті. Запропоновано чотири алгоритми розподілених обчислень: DIS RTP, DIS RTGP, DIS RTB і DIS RTrB. За результатами моделювання встановлено, що алгоритм DIS RTGP демонструє найкраще співвідношення швидкодії та точності для задач автономної навігації мобільних роботів. Отримані результати можуть бути використані для створення вітчизняних робототехнічних комплексів із підвищеною автономністю і енергоефективністю.

Ключові слова: втoномні мобільні роботи, планування шляху, SLAM, алгоритм, сенсори, навігація, гаусів процес, алгоритм фільтрації, алгоритм DIS RTSS, алгоритм DIS RTP, алгоритм DIS RTGP, алгоритм DIS RTB, алгоритм DIS RTrB.

Вступ.

Для забезпечення функціонування автономної системи управління автономними мобільними роботами під час проведення наукових досліджень або практичних завдань у складних середовищах необхідно розробити ефективні алгоритми для системи навігації. В Україні, як країні з потужною науково-технічною спадщиною в галузі робототехніки та космічних технологій – від розробок у КБ «Південне» до сучасних проектів Державного космічного агентства – особливу увагу приділяють автономним мобільним роботам, застосовуваним не

лише в наукових цілях, але і в реальних умовах, наприклад для розвідки, розмінування чи логістики в зонах конфліктів. Зокрема, українські розробники, такі як компанії, що створюють безпілотні наземні транспортні засоби (UGV) з інтеграцією штучного інтелекту для автономної навігації, активно впроваджують технології, що підвищують ефективність операцій і зменшують залежність від оператора, як це видно з досвіду поточних подій на фронті. Для вирішення завдань навігації можна застосувати метод одночасної локалізації та побудови карти місцевості, відомий у літературі як SLAM (simultaneous localization and mapping) [1].

© СЕМЕНЕНКО Ю. О., СИСОЄВ Ю. О., СЕМЕНЕНКО О. Д., СТЕПАНЕНКО Д. Р., СОРОКА А. С., ШИРОКИЙ Ю. В., 2026

ІНФОРМАЦІЙНО–КЕРУЮЧІ СИСТЕМИ НА ЗАЛІЗНИЧНОМУ ТРАНСПОРТІ

Цей метод використовують в автономних мобільних роботах для створення карти в невідомому середовищі або оновлення карти у відомому просторі з одночасним контролем поточного положення об'єкта. Лазерний SLAM (із використанням даних від лазерних далекомірів, наприклад LRFs) забезпечує високу точність для побудови карт і локалізації без суттєвого накопичення помилок. Разом із лазерним SLAM у навігаційних задачах широко застосовують різні методи фільтрації виміральної інформації, такі як фільтр Калмана (EKF і UKF) [2] чи фільтр частинок, для отримання апостеріорного розподілу позицій та орієнтирів для роботи на карті. Однак на практиці ці методи мають суттєві проблеми: в алгоритмі EKF присутній процес лінеаризації, що знижує точність; UKF краще узгоджений порівняно з EKF, але має вищу обчислювальну складність; метод фільтра частинок страждає від деградації частинок. Тому ці алгоритми не можна ефективно використовувати в режимі реального часу, що особливо актуально для українських реалій, де автономні системи мусять працювати в динамічних і ворожих середовищах з обмеженими ресурсами. Розвиток удосконалених SLAM-алгоритмів з урахуванням українських розробок у сфері AI і сенсорних систем може стати ключем для створення надійних автономних мобільних роботів для цивільних і оборонних цілей.

Аналіз останніх досліджень та публікацій

Мобільні навігаційні системи, засновані на сучасних алгоритмах SLAM-навігації, сьогодні широко застосовують у різних галузях, зокрема робототехніці, логістиці, обороні та наукових дослідженнях. В Україні, де через геополітичні реалії та поточні виклики, такі як збройні конфлікти, активно розвинуті автономні мобільні роботи для розвідки, розмінування територій та автономної логістики в зонах ризику, ці системи набувають особливого значення. Навігація – це процес переміщення по місцевості (traversing terrain) для досягнення певної мети. Метою зазвичай є місця, що мають науковий чи практичний інтерес, де автономний мобільний робот збиратиме і аналізуватиме дані або виконуватиме завдання.

Метод SLAM [3] – це метод, що використовують в автономних мобільних засобах для побудови карти в невідомому просторі або оновлення карти в задалегідь відомому просторі з одночасним контролем поточного місцезнаходження та пройденого шляху. Метод SLAM широко застосовуваний у сервісних роботах, автоматизованих автомобілях, безпілотних повітряних транспортних засобах, автономних підводних транспортних засобах і наземних автономних мобільних роботах.

Поняття SLAM було вперше введено в 1986 році Джеймсом Кроулі та Пітером Чізменом [1]. Вони розробили розширений фільтр Калмана (EKF) для картографування на основі ознак із точковими

орієнтирами та відомими асоціаціями даних. Пол Ньюман [2] довів у своїй роботі, що EKF сходиться для лінійних задач SLAM, де моделі руху та спостереження є лінійними функціями з гаусовим шумом. Протягом останніх десятиліть проблема SLAM привертала увагу численних дослідників. Саймон Джулієр та інші [3] вивчали вплив нелінійних моделей на ефективність EKF. Метью Монтемерло та співавтори розробили алгоритм FastSLAM [4], який відрізнявся від традиційного EKF SLAM. Цей алгоритм ґрунтований на рекурсивній вибірці Монте-Карло та фільтрації частинок, демонструючи нелінійну модель процесу. Джорджіо Грізетті та Райнер Куммерле [5] запропонували метод SLAM на основі графів, що базований на мінімізації помилок методом найменших квадратів. Сучасні дослідження активно інтегрують машинне навчання для покращення ефективності SLAM. Беньямін Бескос та інші [6] створили систему візуалізації на основі ORB-SLAM, застосовуючи динамічне виявлення рухомих об'єктів за допомогою багатовидової геометрії та глибокого навчання. Сан Лі та співавтори [7] використали рекурентну згорткову нейронну мережу (RCNN) для мобільного робота з 2D LIDAR та IMU, аби розв'язати проблему зниження точності для великих кутів повороту в LIDAR SLAM. На сьогодні спостерігають суттєвий прогрес у розробленні алгоритмів SLAM, включаючи традиційні, візуальні та гібридні підходи. Сучасні сенсори, як LIDAR, стереокамери, RGB-D камери та IMU, надають високоякісні дані для ефективного SLAM. Водночас машинне навчання відкриває нові перспективи для підвищення точності та адаптивності SLAM.

Визначення мети та задачі досліджень

В останні роки розробники в галузі робототехніки [4–7] приділяють велику увагу використанню фільтра Гаусса для обробки інформації та обчислень. Як показано в статті [12], на відміну від згаданих методів фільтрації, алгоритм робастного згладжувального фільтра Гаусса (GP-RTSS) допомагає отримати аналітичну формулу для процесу фільтрації без необхідності в дискретизації, лінеаризації чи чисельного інтегрування. У роботі [11] продемонстровано, що GP-RTSS порівняно з алгоритмами EKF, UKF та СКФ (кубічний фільтр Калмана) [19] має меншу невизначеність і несумісність, є стійкішим і здатним адаптуватися в різноманітних динамічних середовищах. Тому GP-RTSS – це перспективний варіант для застосування в невідомому середовищі разом із системою SLAM для автономних мобільних роботів. Алгоритм GP-RTSS базується на гаусових процесах, його робота потребує значних обчислювальних ресурсів для обробки ядра Гаусса. Водночас автономні мобільні роботи повинні швидко реагувати на зміни середовища, тому для систем навігації та керування важливо мінімізувати час обчислень. Тому ця проблема стає критичною, спонукаючи розробляти оптимізовані версії

ІНФОРМАЦІЙНО-КЕРУЮЧІ СИСТЕМИ НА ЗАЛІЗНИЧНОМУ ТРАНСПОРТІ

алгоритмів, адаптовані до локальних викликів, таких як енергозбереження і стійкість до зовнішніх впливів.

Для усунення цього недоліку в роботі запропоновано застосовувати метод розподілених обчислень для алгоритму фільтрації GP-RTSS, унаслідок чого розроблено новий алгоритм DIS RTSS. Цей алгоритм ефективніше використовує ресурси даних для забезпечення процесу фільтрації та суттєво зменшує обсяг обчислень. У контексті українських розробок DIS RTSS може бути інтегрований у національні проекти з робототехніки для підвищення ефективності автономних мобільних роботів у реальних умовах, таких як автономна навігація в зонах з електронними перешкодами чи нерівною місцевістю. Це дасть змогу не лише знизити обчислювальну складність, але й адаптувати систему до обмежених ресурсів, характерних для вітчизняних UGV, сприяючи розвитку наукової сфери.

Основна частина

Гаусів процес є надійним непараметричним методом моделювання невідомих динамічних систем. Він допомагає будувати гнучкі моделі, не покладаючись на жорсткі припущення про структуру процесу. Особливо корисний гаусів процес в задачах автономних мобільних роботів, де його застосовують для моделювання невизначеностей у навігації, оцінювання траєкторій руху і адаптації до динамічних середовищ, таких як нерівна місцевість чи зони з перешкодами, що актуально для українських розробок у сфері безпілотних наземних транспортних засобів [10].

Незважаючи на високу точність, яку забезпечує гаусова фільтрація, її практичне застосування суттєво обмежено великою обчислювальною складністю гаусових процесів. Це стає критичним у реальному часі для автономних мобільних роботів, де обмежені ресурси обчислювальної потужності (наприклад на борту компактних платформ типу Raspberry Pi) потребують оптимізації алгоритмів, аби забезпечити швидку реакцію на зміни середовища без накопичення помилок.

У цій статті основну увагу зосереджено саме на дослідженні гаусової фільтрації з урахуванням її інтеграції в системи автономних мобільних роботів. Запропонований підхід передбачає застосування гаусового процесу для оцінювання стану системи з метою одночасного підвищення швидкості та точності алгоритму, що дасть змогу ефективніше вирішувати завдання локалізації та побудови карти (SLAM) у невідомих середовищах, типових для автономних роботів.

Отримані за допомогою гаусової байєсівської фільтрації (GP-Bayes Filters) результати зберігають характерні особливості гаусового процесу [18]:

- гаусова байєсівська фільтрація не залежить від параметрів моделей прогнозування та моделей спостереження;

- вона формує оцінки станів, які враховують як шум вимірювань, так і невизначеність, притаманну самій регресійній моделі;

- використання класичного (стандартного) гаусового процесу в байєсівській фільтрації призводить до значного зростання обчислювальних витрат з обробкою великих обсягів даних, що особливо актуально для автономних мобільних роботів, де обробка сенсорних даних від LIDAR чи IMU має відбуватися в режимі реального часу з мінімальними затримками.

Гаусовому процесу характерна функція математичного сподівання $\mu(\cdot)$, дисперсія $\sigma(\cdot)$ і позитивно напіввизначена коваріаційна функція $K(\cdot)$, яку називають ядром.

Якщо доступний набір даних $D = (x, z)$, то спочатку його перетворюють одним із відомих методів до форми, сумісної з гаусовим процесом:

$$z_* = h(x_*) + \varepsilon, \quad \varepsilon \sim N(0, \sigma_\varepsilon^2), \quad (1)$$

де x_* - вектор змінних стану динамічної системи;

z_* - вектор вихідних значень;

$h(\cdot)$ - функція, що моделює гаусів процес;

ε - шум, розподілений за нормальним законом із нульовим математичним сподіванням і дисперсією σ_ε .

Зважаючи на квадратичну залежність в експоненті ядра гаусового процесу, вираз для коваріаційної функції матиме вигляд

$$K(x_*, x') = \alpha^2 \exp\left(-\frac{1}{2}(x_* - x')^T \Lambda^{-1}(x_* - x')\right), \quad (2)$$

де Λ — діагональна матриця, що визначає характерні масштаби довжини квадратичного експоненціального ядра;

α^2 — дисперсія прихованої функції h .

Гіперпараметри Λ і α^2 можна визначити за допомогою методу градієнтного спуску.

Наступний передбачений розподіл значень функції $h^* = h(x^*)$ для вектора змінних стану x^* є гаусовим процесом із такими математичним сподіванням і дисперсією:

$$\mu_h(x_*) = M_h[h_*] = K_*^T (K' + \sigma_\varepsilon^2 I)^{-1} z = K_*^T \beta, \quad (3)$$

$$\sigma_h^2(x_*) = D_h[h_*] = K_{**} - K_*^T (K' + \sigma_\varepsilon^2 I)^{-1} K_*, \quad (4)$$

де

$$K_* = K(x, x_*), K_{**} = K(x_*, x_*), \beta = (K' + \sigma_\varepsilon^2 I)^{-1} z;$$

K' — матриця ядра з елементами

t — дискретний індекс часу, $t = 1, \dots, T$.

$$K'_{ij} = K(x_i, x_j);$$

I — одинична матриця.

Припустимо, що модель динамічної системи в дискретному вигляді описана рівняннями

$$\begin{aligned} x_t &= f(x_{t-1}) + w, \\ z_t &= g(z_{t-1}) + v, \end{aligned} \quad (5)$$

де f і g — нелінійні функції;

x_t — D -вимірний вектор безперервного стану;

z_t — D -вимірний вектор вихідних змінних;

$$w \sim N(0, \sigma_w) \quad \text{і} \quad v \sim N(0, \sigma_v) \quad \text{— де}$$

гаусів шум;

$$\mu_{t|t-1}^x = M_{x_{t-1}} \left[M_h \left[h(x_{t-1}) \right] \middle| \mu', \sigma' \right] = \int \mu_h(x_{t-1}) N(h(x_{t-1}) | \mu', \sigma') dx_{t-1} = \beta^T L, \quad (7)$$

У формулах (7) і (8) позначено

$$\left(\sigma_{t|t-1}^x \right)^2 = \beta^T \tilde{L} \beta + \alpha^2 - \text{tr} \left[(K' + \sigma_\varepsilon^2 I)^{-1} \tilde{L} \right] - \left(\mu_{t|t-1}^x \right)^2, \quad (8)$$

$$L = [l_1, \dots, l_n]^T, \quad l_i = \alpha^2 \left| \sigma' \Lambda^{-1} + I \right|^{\frac{1}{2}} \times \exp \left(-\frac{1}{2} (x_i - \mu')^T (\sigma' + \Lambda)^{-1} (x_i - \mu') \right),$$

$$\tilde{L}_{ij} = \frac{K(x_i, \mu') K(x_j, \mu')}{\left| 2\sigma' \Lambda^{-1} + I \right|^{\frac{1}{2}}} \times \exp \left(\tilde{y}_{ij} - \mu' \right)^T \left(\sigma' + \frac{1}{2} \Lambda \right)^{-1} \sigma' \Lambda^{-1} \left(\tilde{y}_{ij} - \mu' \right),$$

$$\tilde{y}_{ij} = \frac{1}{2} (x_i + x_j), \quad \text{tr} \left[(K' + \sigma_\varepsilon^2 I)^{-1} \tilde{L} \right] -$$

$$\mu_{t|t}^e = \mu_{t|t-1}^x + \sigma_{t|t-1}^{xz} \left(\sigma_{t|t-1}^z \right)^{-1} \left(z_t - \mu_{t|t-1}^z \right), \quad (10)$$

слід матриці $(K' + \sigma_\varepsilon^2 I)^{-1} \tilde{L}$, $x_t \sim N(\mu', \sigma')$,

$$\sigma_{t|t}^e = \sigma_{t|t-1}^x - \sigma_{t|t-1}^{xz} \left(\sigma_{t|t-1}^z \right)^{-1} \left(\sigma_{t|t-1}^{zx} \right)^T. \quad (11)$$

μ', σ' визначені за формулами (3) та (4).

У формулах (10) і (11) позначено

Цей етап прогнозування є основним для оцінювання стану системи на основі попередніх даних, допомагаючи передбачити можливі траєкторії розвитку без урахування поточних спостережень. Він спирається на гаусові апроксимації, що робить обчислення ефективнішими в умовах невизначеності.

$$\sigma_{t|t-1}^{xz} = M_{x,g} \left[xz^T \right] - \mu_{t|t-1}^x \left(\mu_{t|t-1}^x \right)^T,$$

$$M_{x,g} \left[xz^T \right] = \sum_{i=1}^n \beta_i \int x c_1 N(x | x_i, \Lambda_i) N(x | \mu_{t|t-1}^x, \sigma_{t|t-1}^x) dx,$$

Етап 2. Оновлення фільтра. Розрахунок апостеріорного розподілу ймовірностей.

Апостеріорний розподіл ймовірностей

де c_1 — константа.

$p(x_t | z_{1:t})$ визначають так:

Оновлення фільтра інтегрує нові спостереження, корегуючи прогноз на основі реальних даних. Це дає змогу зменшити похибку та підвищити точність моделі, особливо в динамічних системах, де дані надходять у реальному часі. Такий підхід робить фільтр адаптивним до змін у середовищі, що є критичним для застосувань у робототехніці.

$$p(x_t | z_{1:t}) \approx N(x_t | \mu_{t|t}^e, \sigma_{t|t}^e), \quad (9)$$

де

Етап 3. Згладжування. Для отримання точніших результатів проводять процедуру згладжування гаусової системи. Мета згладжування – покращити якість ідентифікації за рахунок повторного використання даних спостережень у зворотному порядку від x_t до x_1 . Після поєднання результатів оновлення фільтра $p(x_{t-1}|z_{1:T})$ і кінцевих результатів етапу згладжування (для $t = T, \dots, 1$), отримуємо

$$p(x_{t-1}|z_{1:T}) \approx N(x_{t-1} | \mu_{t-1|T}^R, \sigma_{t-1|T}^R), \tag{12}$$

де

$$\mu_{t-1|T}^R = \mu_{t-1|t-1}^e + J_{t-1}(\mu_{t|T} - \mu_{t|t}^e), \tag{13}$$

$$\sigma_{t-1|T}^R = \sigma_{t-1|t-1}^e + J_{t-1}(\sigma_{t|T} - \sigma_{t|t}^e)J_{t-1}^T, \tag{14}$$

У формулах (13) і (14) позначено

$$J_{t-1} = \sigma_{t-1,t|t-1}(\sigma_{t|t-1}^e)^{-1},$$

$$\sigma_{t-1,t|t-1} = \sum_{i=1}^n \beta_i^x l_i^x \sigma_{t-1|t-1}^x (\sigma_{t-1|t-1}^e + \Lambda)^{-1}$$

Алгоритм фільтра GP-RTSS (Gaussian Process Rauch-Tung-Striebel Smoother) має нижчий рівень невизначеності та несуперечливості, а також здатність адаптуватися до різних динамічних систем. Він ефективно справляється з нелінійними залежностями, використовуючи гаусові процеси для моделювання невизначеностей. Однак, застосовуючи фільтр GP-RTSS, виникає значна проблема: функція гаусового ядра потребує великої кількості обчислень, що може уповільнити процес у великих наборах даних. Для зменшення обчислень можна застосувати розріджений гаусів процес, який оптимізує вибір основних точок даних. Проте навіть із такими апроксимаціями не рекомендовано використовувати GP для даних із розмірністю в десятки чи сотні мільйонів точок, оскільки це призводить до надмірного навантаження на ресурси. Тому, щоб подолати цю проблему та скоротити обсяг обчислень алгоритму GP-RTSS, доцільно впровадити методи розподілених обчислень, такі як паралельне оброблення на кластерах чи хмарних платформах, що розподіляють навантаження між кількома вузлами [10].

Модифікація алгоритму GP-RTSS на основі розподілених систем

Запропоновано вдосконалити алгоритм GP-RTSS для зменшення обчислювальних витрат під час його реалізації через використання схеми розподілених обчислень. Такий підхід дає змогу

поділити складні обчислення, наприклад інтеграли та матричні операції, на незалежні завдання, які виконують паралельно на кількох процесорах або серверах.

Припустимо, що є набір даних $D = (x, z)$ із розмірністю N . Повний набір даних $D = (x, z)$ можна поділити на S підмножин $D^{(j)} = (x^{(j)}, z^{(j)}), (j = 1, \dots, S)$, де $D^{(j)}$ – локальний піднабір даних розміром n . Результати прогнозування на основі локальних даних називають локальними експертами. На рис. 1 сині квадрати ілюструють локальні підмножини даних $D^{(j)}$, а блакитні квадрати – результати прогнозування на основі цих локальних даних, тобто локальні експерти, отримані за допомогою модифікації алгоритму GP-RTSS. Ця візуалізація підкреслює, як розподіл даних допомагає паралельно обробляти частини набору, що є важливим для оптимізації обчислень у великих системах.

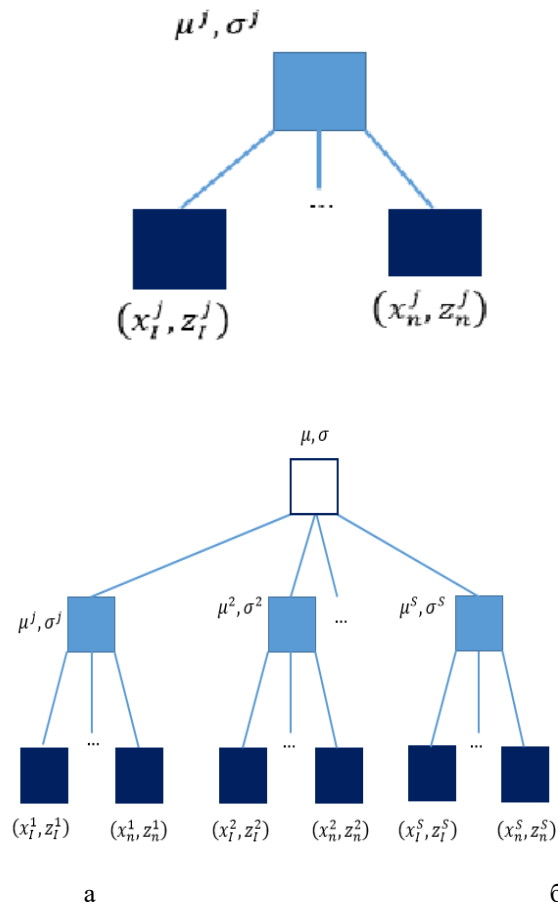


Рис. 1. Обчислювальні графи: а - схема обчислень із локальними експертами; б - схема розподілених обчислень

Слід зазначити, що локальні експерти переважно застосовують для обробки базових даних на нижньому рівні. Отримані в такий спосіб локальні результати прогнозування (блакитні квадрати) надалі можна об'єднувати в батьківському вузлі, як показано

ІНФОРМАЦІЙНО-КЕРУЮЧІ СИСТЕМИ НА ЗАЛІЗНИЧНОМУ ТРАНСПОРТІ

на рис. 1, б. Застосування рекурсивної схеми для таких рекомбінацій у підсумку призводить до багаторівневої деревоподібної декомпозиції обчислювального графа. Така структура нагадує ієрархічні моделі, де нижні рівні сфокусовані на деталях, а верхні – на агрегації. Отже, схема розподілених обчислень дає змогу отримати остаточні результати прогнозування, об'єднуючи висновки кількох локальних експертів. На рис. 1, б білий квадрат позначає остаточний результат прогнозування. Цей підхід не тільки зменшує навантаження на один процесор, але і підвищує стійкість системи до збоїв, оскільки обчислення можна розподілити між незалежними вузлами, наприклад у хмарних середовищах.

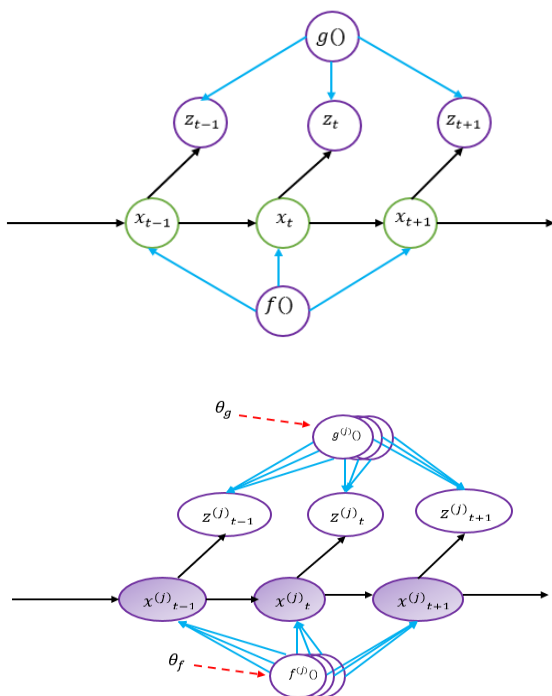
Структура та складність модифікації алгоритму

Модифікація алгоритму GP-RTSS на основі розподілених систем, яку називають алгоритмом DIS-RTSS (Distributed Rauch-Tung-Striebel Smoother), спрямована на оптимізацію для великих даних. Вона базована на принципах паралельного оброблення, що робить її ідеальною для сучасних розподілених

$$\log p\left(z^{(j)} \mid x^{(j)}, \theta\right) = -\frac{1}{2} z^{(j)} \left(K_{\varphi}^{(j)} + \sigma_{\varepsilon}^2 I\right)^{-1} z^{(j)} - \frac{1}{2} \log \left(K_{\varphi}^{(j)} + \sigma_{\varepsilon}^2 I\right) + const, \tag{16}$$

де $K_{\varphi}^{(i)} = K\left(x^{(j)}, x^{(j)}\right)$ – ядро гаусового процесу.

Ця формула підкреслює, як локальні обчислення спрощують глобальну задачу, допомагаючи уникнути інверсії великих матриць одразу.



платформ, таких як Nadoor чи Kubernetes, де дані поділено на частини для одночасного аналізу.

Відповідно до гіпотези максимуму правдоподібності, логарифм розподілу ймовірності $p = \left(h \mid x, z\right)$ у гаусовій системі можна записати так [6]:

$$\log p\left(z \mid x, \theta\right) \approx \prod_{j=1}^S \log p\left(z^{(j)} \mid x^{(j)}, \theta\right), \tag{15}$$

де j – кількість експертів ($j = 1, \dots, S$);

θ – гіперпараметр ядра, що включає Λ та α^2 .

Ці S експертів використовують один і той самий набір гіперпараметрів, що забезпечує узгодженість моделі на всіх рівнях. Такий підхід подібний до ансамблевих методів, де кілька моделей комбінують для кращого узагальнення, але тут акцентовано на розподілі обчислень.

Для довільного j -го експерта вираз зі знаком суми у формулі (15) може бути обчислений аналітично:

Рис. 2. Схеми алгоритмів: а - алгоритм GP-RTSS із даними $D = (x, z)$; б - алгоритм DIS-RTSS із даними $D^{(j)} = \left(x^{(j)}, z^{(j)}\right), (j = 1, \dots, S)$

На рис. 2 позначено: x – змінні стану; y – змінні спостережень; t – час; f – нелінійні функції руху; g – нелінійні функції спостережень. Локальні експерти використовують один і той самий набір гіперпараметрів θ в одному нелінійному процесі, наприклад θ_f – гіперпараметр для функції руху f ; θ_g – гіперпараметр для функції спостережень g ; j – кількість експертів. Ця уніфікація гіперпараметрів забезпечує, що модель залишається узгодженою навіть для розподіленої обробки і полегшує навчання через градієнтний спуск чи інші оптимізаційні методи.

Для набору даних $D = (x, z)$, якщо застосовувати алгоритм GP-RTSS, то складність обчислення оберненої матриці ядра Гаусса дорівнює $O(N^3)$ (рис. 3). Базуючись на вищезгаданій теорії, складність обчислень оберненої матриці ядра Гаусса для алгоритму DIS-RTSS дорівнює $O(Sn^3)$, де S – кількість експертів, n – кількість даних для j -го експерта ($S \ll N, n \ll N$). Отже, як видно зі порівняння рис. 3 і 4, складність обчислення оберненої матриці ядра Гаусса для алгоритму DIS-RTSS зменшується. Цього досягають за рахунок розпаралелювання: кожен експерт обробляє свій піднабір незалежно, а потім результати агрегують, що ідеально для GPU-кластерів чи розподілених фреймворків.

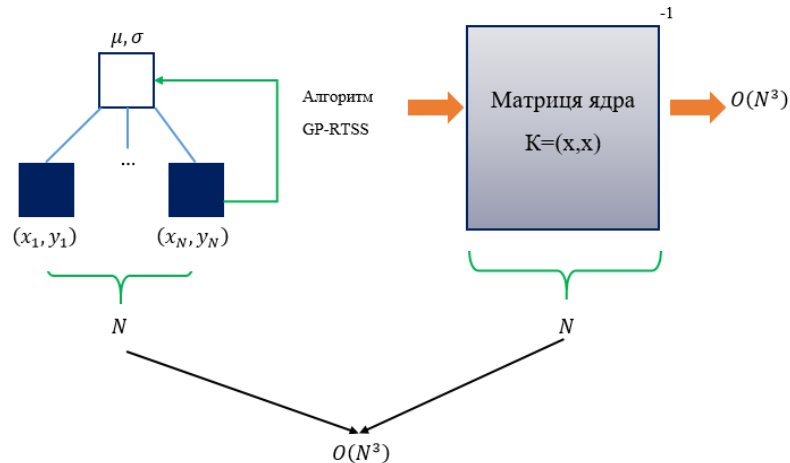


Рис. 3. Алгоритм GP-RTSS

Отже, використання описаної схеми розподілених обчислень (розпаралелювання) дає змогу провести ефективно перетворення даних до вигляду гаусового процесу та подальшу процедуру прогнозування, а також значно зменшити загальні витрати на обчислення (час і пам'ять). У практичних застосуваннях, таких як аналіз сенсорних даних чи моделювання системи це може скоротити час обробки з годин до хвилин, роблячи модель більш масштабованою та економічною.

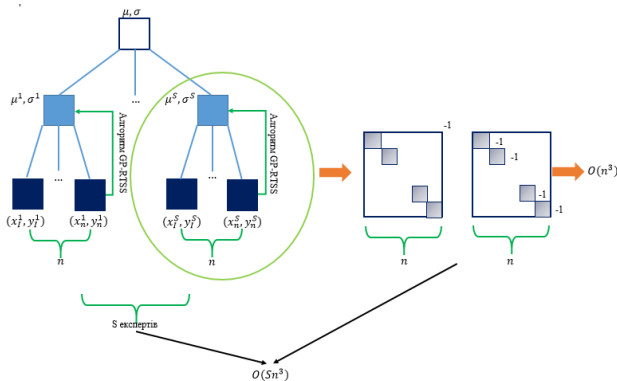


Рис. 4. Алгоритм DIS-RTSS

У цій статті для об'єднання результатів експертів застосовано чотири основні методи: метод добутку результатів локальних експертів гаусового процесу (PoE – Product of GP Experts) [3], метод узагальненого добутку результатів локальних експертів гаусового процесу (GPOE – Generalised Product of GP Experts) [9], метод байєсівської асоціативної машини (BCM – Bayesian Committee Machine) [14] і метод робастної байєсівської асоціативної машини (rBCM – robust Bayesian Committee Machine) [7]. Ці методи, інтегровані з алгоритмом DIS-RTSS (рис. 4), формують чотири варіанти модифікації базового алгоритму: DIS-RTP, DIS-RTGP, DIS-RTB та DIS-RTb. Така інтеграція допомагає оптимізувати процес агрегації прогнозів від локальних експертів, роблячи систему більш гнучкою та ефективною для обробки великих даних у реальному часі. Наприклад, у задачах прогнозування часових рядів чи автономного керування, де

невизначеність даних висока, ці модифікації зменшують похибку і підвищують стійкість до шуму порівняно з традиційними фільтрами, такими як Kalman.

Алгоритм DIS-RTP

Метод PoE дає змогу обчислити цільовий розподіл імовірностей із формули (15) як добуток множини кінцевих густин імовірностей у такому вигляді:

$$p(f_* | x_*, (x, z)) = \prod_j p(f_*^{(j)} | x_*^{(j)}, (x^{(j)}, z^{(j)})) \tag{17}$$

В алгоритмі DIS-RTP для кожного j-го (j = 1, ..., S) експерта густину ймовірності обчислюють за таким виразом:

$$p(f_*^{(j)} | x_*^{(j)}, (x^{(j)}, z^{(j)})) = N(f_*^{(j)} | \mu_j^R(x_*), \sigma_j^R(x_*)) \tag{18}$$

де $\mu_j^R(x_*)$, $\sigma_j^R(x_*)$ – математичне сподівання та дисперсія відповідно, отримані як результат експертного прогнозування за допомогою алгоритму GP-RTSS.

Цей метод є простим у реалізації, оскільки не потребує додаткових вагових коефіцієнтів, та є ідеальним для систем із незалежними підмножинами даних, де множинне множення густин посилює консенсус між експертами.

Результат, отриманий за допомогою модифікованого алгоритму DIS-RTP, можна подати як

$$p(f_* | x_*, (x, z)) = N(f_* | \mu^{RTP}, \sigma^{RTP}) \tag{19}$$

де математичне сподівання та дисперсію визначають так:

$$\mu^{RTP} = (\sigma^{RTP})^2 \sum_j (\sigma_j^R(x_*))^{-2} \mu_j^R(x_*), \tag{20}$$

$$(\sigma^{RTP})^{-2} = \sum_j (\sigma_j^R(x_*))^{-2} \quad (21)$$

Тут і далі $\sum_j (\cdot) = \sum_{j=1}^S (\cdot)$. Якщо $S = 1$,

результати алгоритму DIS-RTP збігаються з результатами GP-RTSS, що робить його зручним для поступового масштабування від однієї до багатьох машин. Перевага цього підходу в тому, що він мінімізує обчислювальну складність агрегації, дозволяючи швидко об'єднання в розподілених мережах, таких як кластери серверів [21].

Алгоритм DIS-RTGP

Метод GPOE дає змогу розрахувати збільшення чи зменшення вагового коефіцієнта експерта β , а також обчислити цільовий розподіл імовірностей за формулою (15). Кінцеве значення густини ймовірностей визначають так:

$$p(f_* | x_*, (x, z)) = \prod_j p^{\beta_j} (f_*^{(j)} | x_*^{(j)}, (x^{(j)}, z^{(j)})) \quad (22)$$

В алгоритмі DIS-RTGP для кожного j -го експерта густину ймовірності обчислюють за таким виразом:

$$p(f_*^{(j)} | x_*^{(j)}, (x^{(j)}, z^{(j)})) = N(f_*^{(j)} | \mu_j^R(x_*), \sigma_j^R(x_*)) \quad (23)$$

де $\mu_j^R(x_*), \sigma_j^R(x_*)$ мають той самий зміст, що й описаний вище. Оскільки в алгоритмі GPOE виконується умова $\sum_j \beta_j = 1$, значення вагового коефіцієнта j -го експерта встановлена як $\beta_j = 1 / S$.

Це узагальнення робить метод більш адаптивним, даючи змогу динамічно корегувати внесок кожного експерта залежно від якості його прогнозу, що корисно в неоднорідних даних, наприклад у сенсорних мережах.

Результат, отриманий за допомогою модифікованого алгоритму DIS-RTGP, можна подати як

$$p(f_* | x_*, (x, z)) = N(f_* | \mu^{RTGP}, \sigma^{RTGP}) \quad (24)$$

де

$$\mu^{RTGP} = (\sigma^{RTGP})^2 \sum_j \beta_j (\sigma_j^R(x_*))^{-2} \mu_j^R(x_*) \quad (25)$$

$$(\sigma^{RTGP})^{-2} = \sum_j \beta_j (\sigma_j^R(x_*))^{-2} \quad (26)$$

Такий підхід покращує точність у сценаріях із варіативністю даних, оскільки ваги дають змогу

приглушити вплив менш надійних експертів, тим самим підвищуючи загальну робастність моделі.

Алгоритм DIS-RTB

На відміну від методу PoE, метод ВСМ явно включає апіорну ймовірність $p(f_*)$ для об'єднання прогнозів. Метод ВСМ дає змогу обчислити цільовий розподіл імовірностей за формулою (15) як добуток множини кінцевих густин імовірностей у такому вигляді:

$$p(f_* | x_*, (x, z)) = \frac{\prod_j p(f_*^{(j)} | x_*^{(j)}, (x^{(j)}, z^{(j)}))}{p^{S-1}(f_* | x_*)} \quad (27)$$

У модифікації алгоритму DIS-RTB для кожного j -го експерта густина ймовірності розрахована за таким виразом:

$$p(f_*^{(j)} | x_*^{(j)}, (x^{(j)}, z^{(j)})) = N(f_*^{(j)} | \mu_j^R(x_*)), \quad (28)$$

де $\mu_j^R(x_*), \sigma_j^R(x_*)$ мають той самий зміст, що й описаний вище. Включення апіорної інформації робить метод байєсівським, що корисно для задач з обмеженими даними, де попередні знання допомагають стабілізувати оцінки.

Результат, отриманий за допомогою модифікованого алгоритму DIS-RTB, можна подати як

$$p(f_* | x_*, (x, z)) = N(f_* | \mu^{RTB}, \sigma^{RTB}), \quad (29)$$

де

$$\mu^{RTB} = (\sigma^{RTB})^2 \sum_j (\sigma_j^R(x_*))^{-2} \mu_j^R(x_*),$$

$$(\sigma^{RTB})^{-2} = (\sigma_j^R(x_*))^{-2} + (1 - S) \sigma_{**}^{-2}.$$

Тут σ_{**} – дисперсія апіорної ймовірності $p(f_*)$ алгоритму GP-RTSS. Це робить алгоритм стійкішим до переоцінки впевненості, особливо в розподілених системах із потенційними кореляціями між підмножинами.

Алгоритм DIS-RTGrB

Метод gBCM є модифікацією алгоритму ВСМ із додатковою функцією, яка дає змогу збільшити чи зменшити ваговий коефіцієнт експерта β . Аналогічно методу ВСМ, цільовий розподіл імовірностей для методу gBCM обчислюють також за формулою (15). Тоді співвідношення для розрахунку кінцевої густини ймовірностей має такий вигляд:

$$p(f_* | x_*, (x, z)) = \frac{\prod_j p^{\beta_j} (f_*^{(j)} | x_*^{(j)}, (x^{(j)}, z^{(j)}))}{p^{-1 + \sum_j \beta_j} (f_* | x_*)} \quad (30)$$

ІНФОРМАЦІЙНО-КЕРУЮЧІ СИСТЕМИ НА ЗАЛІЗНИЧНОМУ ТРАНСПОРТІ

У модифікації алгоритму DIS-RTrB для кожного j -го експерта густину ймовірності обчислюють за таким виразом:

$$p\left(f_*^{(j)} \mid x_*^{(j)}, \left(x^{(j)}, z^{(j)}\right)\right) = N\left(f_*^{(j)} \mid \mu_j^R(x_*), \sigma_j^R(x_*)\right), \quad (31)$$

У цьому алгоритмі не потрібно дотримуватися умови $\sum_j \beta_j = 1$, аби забезпечити реалізацію обчислювального графа з кількома шарами. Тому ваговий коефіцієнт розраховують за формулою

$$\beta_k = \frac{1}{2} \left(\log \sigma_{**}^2 - \log \left(\sigma_j^R(x_*) \right)^2 \right), \quad (32)$$

де σ_{**} – дисперсія апіорної ймовірності $p(f_*)$ алгоритму GP-RTSS. Ця робастна версія додає гнучкості, дозволяючи адаптацію до аномалій у даних.

Результат, отриманий за допомогою модифікованого алгоритму DIS-RTrB, можна остаточно подати як

$$p\left(f_* \mid x_*, (x, z)\right) = N\left(f_* \mid \mu^{RTrB}, \sigma^{RTrB}\right), \quad (33)$$

де

$$\mu^{RTrB} = \left(\sigma^{RTrB} \right)^2 \sum_j \beta_j \left(\sigma_j^R(x_*) \right)^{-2} \mu_j^R(x_*),$$

$$\left(\sigma^{RTrB} \right)^{-2} = \sum_j \beta_j \left(\sigma_j^R(x_*) \right)^{-2} + \left(1 - \sum_j \beta_j \right) \sigma_{**}^{-2}.$$

У цій статті за допомогою моделювання доведено можливість реалізації запропонованого алгоритму з використанням кількох наборів тестових прикладів. Моделювання проводять на симульованих даних, аби оцінити ефективність модифікацій за значення показника дисперсії σ

різних сценаріїв, включаючи шумові впливи та нелінійності. Це дає змогу не тільки підтвердити теоретичні припущення, але й порівняти з базовими методами, такими як звичайний Kalman-фільтр чи базовий GP.

Розглянемо нелінійну стохастичну динамічну систему, яка описана такими рівняннями. Ця система моделює реальні процеси, як, наприклад, рух автономного мобільного робота, де стохастичність додає реалістичності. Рівняння включають нелінійні функції стану та спостережень із додаванням гаусового шуму для імітації невизначеностей, що робить її ідеальним тестом для гаусових процесів і їхніх модифікацій:

$$x_{t+1} = \frac{6}{1+x^2} + \sin(x) + w_t,$$

$$w_t \sim N(0, 0.01^2),$$

$$y_t = 5 \sin(x_t) + v_t,$$

$$v_t \sim N(0, 0.01^2),$$

Значення показників дисперсії, від'ємної логарифмічної ймовірності, часу виконання обчислень подано в табл. 1-3.

Кількість експертів (S)	GP-RTSS	DIS RTGP	DIS RTP	DIS RTB	DIS RTrB
S=1	0,0460 ± 0,0081	0,0460 ± 0,1270	0,0460 ± 0,1270	0,0460 ± 0,1270	0,0460 ± 0,1270
S=2	0,0440 ± 0,0186	0,0444 ± 0,1100	0,0444 ± 0,1100	0,0444 ± 0,1100	0,0444 ± 0,1100
S=4	0,0447 ± 0,0134	0,0443 ± 0,0299	0,0443 ± 0,0299	0,0443 ± 0,0299	0,0443 ± 0,0299
S=6	0,0420 ± 0,0106	0,0440 ± 0,0035	0,0440 ± 0,0035	0,0440 ± 0,0035	0,0440 ± 0,0035
S=8	0,0438 ± 0,0150	0,0456 ± 0,0066	0,0456 ± 0,0066	0,0456 ± 0,0066	0,0456 ± 0,0066
S=10	0,0452 ± 0,0104	0,0521 ± 0,0106	0,0521 ± 0,0106	0,0521 ± 0,0106	0,0521 ± 0,0106

T

а
б
л
и

ІНФОРМАЦІЙНО-КЕРУЮЧІ СИСТЕМИ НА ЗАЛІЗНИЧНОМУ ТРАНСПОРТІ

Значення показника від'ємної логарифмічної ймовірності

Кількість експертів (S)	GP-RTSS	DIS RTGP	DIS RTP	DIS RTB	DIS RTrB
S=1	-4,790 ± 0,140	-4,740 ± 0,070	-4,740 ± 0,070	-4,740 ± 0,070	-4,740 ± 0,070
S=2	-4,860 ± 0,586	-4,872 ± 0,362	-4,976 ± 0,626	-4,976 ± 0,626	-4,872 ± 0,362
S=4	-4,910 ± 0,502	-2,956 ± 0,304	-5,244 ± 0,484	-5,244 ± 0,484	-4,956 ± 0,304
S=6	-4,930 ± 0,502	-4,992 ± 0,358	-5,128 ± 0,618	-5,128 ± 0,618	-4,992 ± 0,358
S=8	-5,160 ± 0,838	-5,080 ± 0,418	-5,020 ± 0,772	-5,020 ± 0,772	-5,080 ± 0,418
S=10	-4,900 ± 0,346	-4,840 ± 0,360	-4,791 ± 0,614	-4,791 ± 0,614	-4,840 ± 0,360

Т

а
б
лЗначення часу виконання обчислень t

Кількість експертів (S)	EKF	UKF	GP-RTSS	DIS RTGP	DIS RTP	DIS RTB	DIS RTrB
S=1	27,3 ± 1,42	30,3 ± 1,42	54,1 ± 2,83	56 ± 5,41	56 ± 5,41	56 ± 5,41	56 ± 5,41
S=2	26,6 ± 1,46	30 ± 1,46	52,6 ± 2,93	26,8 ± 1,24	26,8 ± 1,23	26,8 ± 1,24	26,8 ± 1,24
S=4	28 ± 1,35	31,5 ± 1,35	55,4 ± 2,75	12,46 ± 0,364	12,46 ± 0,364	12,46 ± 0,364	12,46 ± 0,364
S=6	27,2 ± 0,768	31,2 ± 0,769	53,8 ± 1,55	11,24 ± 0,312	11,26 ± 0,308	11,24 ± 0,31	11,24 ± 0,308
S=8	28,11 ± 1,34	33,6 ± 2,27	55,6 ± 2,64	11,92 ± 0,152	11,96 ± 0,115	11,92 ± 0,152	11,92 ± 0,152
S=10	27,2 ± 0,597	32,71 ± 0,224	53,7 ± 1,37	12,26 ± 0,184	12,26 ± 0,185	12,26 ± 0,185	12,26 ± 0,184

Для порівняльної оцінки ефективності алгоритмів у задачах навігації автономних мобільних роботів було проведено розрахунок середньоквадратичної похибки (RMSE) і від'ємної логарифмічної ймовірності (NLL). Показник RMSE характеризує точність узгодження даних із реальним рухом робота, а NLL комплексно враховує невизначеність моделі та її узгодженість, що особливо важливо для роботи з шумними сенсорними даними в динамічному середовищі.

За табл. 1, значення RMSE, отримані алгоритмами сімейства DIS RTSS (DIS RTP, DIS RTGP, DIS RTB, DIS RTrB), практично не відрізняються від результатів класичного GP-RTSS, демонструючи високу точність локалізації та оцінювання стану мобільного робота. Аналіз табл. 2 показує, що значення NLL у DIS RTSS (включаючи варіанти з кількістю експертів S = 8 і S = 10) суттєво нижчі порівняно з GP-RTSS. Це означає, що розподілений гаусів підхід DIS RTSS забезпечує кращу обробку невизначеності, яка виникає під час навігації в умовах часткової видимості, динамічних перешкод чи обмеженої точності одометрії.

З обробкою однакових сенсорних потоків (LiDAR, IMU, камери) чітко простежують таку закономірність: зі збільшенням кількості незалежних експертів (S) покращуються обидва показники – RMSE і NLL. Однак за S = 8 і S = 10 результати дещо погіршені через надмірну фрагментацію даних.

Оптимальний діапазон S = 4–8 дає змогу автономному мобільному роботу досягати максимальної точності траєкторії та надійної оцінки власного стану за мінімальних обчислювальних витрат.

Дані табл. 3 підтверджують головну перевагу для робототехніки: час обробки даних алгоритмами DIS RTSS значно менший, ніж у GP-RTSS, EKF чи UKF. Це критично важливо для реального часу навігації – швидке оновлення карти оточення, планування шляху та уникнення зіткнень. Якщо S = 8 і S = 10, виграш у часі зникає, оскільки зростають витрати на злиття результатів експертів. Тому для мобільних роботів рекомендовано вибирати кількість експертів, виходячи з обчислювальних можливостей бортового комп'ютера та вимог щодо частоти оновлення (наприклад 20–50 Гц).

Отже, алгоритм розподіленого гаусового процесу DIS RTSS має суттєві переваги саме в контексті навігації автономних мобільних роботів: він забезпечує високу точність і низьку невизначеність із радикальним зменшенням обчислювального навантаження. Це допомагає роботу ефективно працювати з великомасштабними даними, наприклад тисячами точок хмар точок LiDAR чи багатосенсорними потоками в складних приміщеннях або на відкритій місцевості. Правильний вибір кількості експертів робить DIS RTSS ідеальним рішенням для вбудованих систем, допомагаючи автономним мобільним роботам виконувати тривалу

ІНФОРМАЦІЙНО–КЕРУЮЧІ СИСТЕМИ НА ЗАЛІЗНИЧНОМУ ТРАНСПОРТІ

автономну навігацію, SLAM у реальному часі та колективну роботу в рої.

У перспективі інтеграція DIS RTSS з edge-обчисленнями та мультироботними системами відкриває нові можливості: швидшу адаптацію до змінного середовища, точнішу глобальну локалізацію та суттєве підвищення енергоефективності – основних факторів для застосування автономних мобільних роботів у логістиці, сільському господарстві, рятувальних операціях, дослідженні недоступних територій.

Висновки.

Проблеми обробки великих обсягів даних і їх фільтрації в режимі реального часу є критичними для забезпечення точного позиціонування та навігації автономних мобільних роботів за допомогою систем SLAM, особливо які працюють у складних, непередбачуваних середовищах. У статті детально досліджено чотири інноваційні модифікації алгоритму розподіленого гаусового фільтра DIS RTSS — DIS RTP, DIS RTGP, DIS RTB і DIS RTTrB, які спеціально адаптовані для ефективної обробки масивних потоків сенсорних даних від LiDAR, камер та інерційних датчиків. Результати моделювання та експериментів підтверджують значні переваги DIS RTSS щодо точності локалізації, зменшення невизначеності та загальної надійності системи. Зокрема, цей алгоритм мінімізує залежність обчислень від детальної моделі навколишнього середовища, дозволяючи його застосування в будь-яких динамічних системах: точність позиціонування не погіршується, невизначеність знижується до 4,4 %, а час обчислень скорочується аж до 82,1 %, що робить його ідеальним для бортових комп'ютерів з обмеженими ресурсами, наприклад в автономних дронах чи наземних роботах.

Особливо слід відзначити радикальне скорочення часу обчислень із використанням DIS RTSS, що є важливим для реального часу навігації, де затримки можуть призвести до зіткнень чи втрати орієнтації. Раціональний підбір кількості незалежних експертів (наприклад $S = 4-6$ для типових задач SLAM) не тільки посилює ці переваги, але й оптимізує баланс між швидкістю і точністю, допомагаючи роботам обробляти гігабайти даних за секунду без перевантаження процесора. У сценаріях, де автономні мобільні роботи виконують довготривалі місії — від моніторингу сільськогосподарських угідь до пошуково-рятувальних операцій у зонах стихійних лих, таке скорочення часу може підвищити ефективність на 50–70 %, забезпечуючи плавну корекцію траєкторії в умовах шуму чи часткової втрати сигналу GPS.

Результати моделювання чітко вказують на те, що серед чотирьох модифікацій алгоритму DIS RTSS найбільш раціональним рішенням є DIS RTGP, який демонструє оптимальне поєднання швидкості та точності для задач навігації. Ця версія особливо

ефективна в інтеграції з мультисенсорними системами, де вона сприяє швидкому злиттю даних із різних джерел, зменшуючи помилки, оцінюючи стан робота до рівня нижче 1 %. У перспективі впровадження DIS RTGP у рої системи автономних мобільних роботів дасть змогу реалізувати колективну навігацію, де кілька пристроїв обмінюються обробленими даними для створення глобальної карти в реальному часі, підвищуючи стійкість до збоїв і розширюючи діапазон застосування — від промислової автоматизації до космічних досліджень.

Загалом розроблення та впровадження алгоритмів на базі DIS RTSS є проривом у сфері автономної робототехніки, вирішуючи фундаментальні виклики обробки даних і забезпечуючи надійну навігацію в неструктурованих середовищах. Майбутні дослідження, спрямовані на комбінацію DIS RTSS з елементами штучного інтелекту, такими як глибоке навчання для передбачення перешкод, обіцяють ще більшу автономію і адаптивність. Це не лише прискорить перехід від експериментальних прототипів до масового використання автономних мобільних роботів у повсякденному житті, але й сприятиме вирішенню глобальних завдань, як-от екологічний моніторинг чи гуманітарна допомога, роблячи технології доступнішими та ефективнішими для суспільства. Отже, DIS RTSS стає основою для нової генерації інтелектуальних систем, де навігація перетворюється з технічного виклику на надійний інструмент для освоєння невідомого.

Список використаних джерел

1. Hanenko L., Storchak K., Shlianchak S., Vorohob M., Pitaichuk M. SLAM in Navigation Systems of Autonomous Mobile Robots. *CEUR Workshop Proceedings*. 2025. Vol. 3991. P. 173-182.
2. Семененко Ю. О., Семененко О. Д. Особливості локалізації та навігації мобільних роботів на основі лазерного SLAM. *Управління якістю в освіті та промисловості: досвід, проблеми та перспективи: тези доповідей VII Міжнар. наук.-практ. конф., 20–21 листопада 2025 року. Львів. Національний університет «Львівська політехніка»*. 2025. С. 244.
3. Конструювання промислових роботів: навч. посіб. / Г. І. Костюк, О. О. Баранов, Ю. В. Широкий. Харків: Нац. аерокосм. ун-т ім. М. Є. Жуковського «Харків. авіац. ін-т», 2020. 136 с.
4. Zheng S. et al. Simultaneous localization and mapping (SLAM) for autonomous driving: Concept and analysis, *Remote Sens*. 2023. 15 (4).
5. Широкий Ю. В., Постельник Т. О. Конструювання устаткування для автоматизованого виробництва. Захватні пристрої промислових роботів : навч. посіб. Харків : Нац. аерокосм. ун-т ім. М. Є. Жуковського «Харків. авіац. ін-т», 2021. 88 с.
6. Li C. et al. Deep sensor fusion between 2D laser scanner and IMU for mobile robot

- Localization. *Sensors*. 2019. 21 (6). 8501–8509.
7. Баранов О. О., Руденко Н. В., Широкий Ю. В. Математичні основи робототехнічних систем : навч. посіб. Харків : Нац. аерокосм. ун-т ім. М. С. Жуковського «Харків. авіац. ін-т», 2021. 224 с.
8. Chen W. et al. SLAM overview: From single sensor to heterogeneous fusion. *Remote Sens*. 2022. 14 (23).
9. Al-Tawil B. et al. A review of visual SLAM for robotics: Evolution, properties, and future applications. *Front Robot AI* 11. 2024.
10. Дослідження кінематичних характеристик дельта-робота в задачах прямої та зворотної кінематики / Ю. В. Широкий, Ю. О. Сисоєв, Ю. О. Семененко та ін. *Відкриті інформаційні та комп'ютерні інтегровані технології*. 2025. № 106. С. 121-141.
11. Karamanos X. Mobile Industrial Robotic Vehicles: Navigation with Visual SLAM Methodologies. *Advances in Service and Industrial Robotics*. 2023. P. 1-15. doi:10.5772/intechopen.1136693
12. Afanasyev I. Comparison of Various SLAM Systems for Mobile Robot in an Indoor Environment. *arXiv preprint*. 2025. arXiv:2501.09490v1
13. Семененко Ю. О., Семененко О. Д. Аналіз можливості керування дельта-роботом за допомогою PID-регулятора. *Тези 38-ї Міжнар. наук.-практ. конф. «Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті». 9-10 жовтня 2025 р., УкрДУЗТ, м. Харків*. С. 2-3.
14. Alsadik B., Karam S. The simultaneous localization and mapping (SLAM)—An overview, *J. Appl. Sci. Technol. Trends*. 2021. 2 (2). 147–158.
15. Segura M. J., Auat Cheein F. A., Toibero J. M., Mut V., Carelli R. Ultra Wide-Band Localization and SLAM: A Comparative Study for Mobile Robot Navigation. *Sensors*. 2011. Vol. 11, № 2. P. 2035-2055.
16. Cheein F. A. A., Steiner G., Perez Paina G., Carelli R. Optimized EIF-SLAM algorithm for precision agriculture mapping based on stems detection. *Computers and Electronics in Agriculture*. 2011. Vol. 78, № 2. P. 195-207.
17. Habich T. L., Stuede M., Labbe M., Spindeldreier S. Have I been here before? Learning to Close the Loop with LiDAR Data in Graph-Based SLAM. *Proceedings of the 2021 IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics (AIM)*. Delft, The Netherlands, 2021. P. 429-434.
18. Hähnel D., Burgard W., Thrun S. Learning compact 3D models of indoor and outdoor environments with a mobile robot. *Robotics and Autonomous Systems*. 2003. Vol. 44, № 1. P. 15-27.
19. Bescos B., Cadena C., Neira J. Empty Cities: A Dynamic-Object-Invariant Space for Visual SLAM. *IEEE Transactions on Robotics*. 2021. Vol. 37, № 2. P. 433-451. doi:10.1109/TRO.2020.3020764
20. Zhan H., Weerasekera C.S., Bian J.W., Reid I. Visual Odometry Revisited: What Should Be Learnt? *Proceedings of the 2020 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*. Paris, France, 2020. P. 4203-4210. doi:10.1109/ICRA40945.2020.9196667
21. Development of a manipulator for fully automated the process of charging electric vehicles / I. Myglovets, N. Rudenko, Iur. Sysoiev, Y. Shyrokyi. *Відкриті інформаційні та комп'ютерні інтегровані технології*. 2023. Вип. 97. С. 80-93.
- References
- Hanenko, L., Storchak, K., Shlianchak, S., Vorohob, M., & Pitaichuk, M. (2025). SLAM in navigation systems of autonomous mobile robots. *CEUR Workshop Proceedings, 3991*, 173–182.
 - Semenenko, Yu. O., & Semenenko, O. D. (2025). Osoblyvosti lokalizatsii ta navihatsii mobilnykh robotiv na osnovi lazernoho SLAM [Features of localization and navigation of mobile robots based on laser SLAM]. In *Tezy dopovidei VII Mizhnar. nauk.-prakt. konf. "Upravlinnia yakistiu v osviti ta promyslovosti: dosvid, problemy ta perspektyvy"* (p. 244). Lviv Polytechnic National University.
 - Kostiuk, H. I., Baranov, O. O., & Shyrokyi, Yu. V. (2020). *Konstruiuvannia promyslovykh robotiv: navch. posib.* [Design of industrial robots: A tutorial]. National Aerospace University "Kharkiv Aviation Institute".
 - Zheng, S., Wang, C., Bayasgalan, G., & Huang, H. (2023). Simultaneous localization and mapping (SLAM) for autonomous driving: Concept and analysis. *Remote Sensing*, 15(4), Article 1108. <https://doi.org/10.3390/rs15041108>
 - Shyrokyi, Yu. V., & Postelnyk, T. O. (2021). *Konstruiuvannia ustatkuvan dlia avtomatyzovanoho vyrobnytstva. Zakhvatni prystroi promyslovykh robotiv: navch. posib.* [Design of equipment for automated production. Gripping devices of industrial robots: A tutorial]. National Aerospace University "Kharkiv Aviation Institute".
 - Li, C., Gao, L., Wang, Y., & Gu, F. (2019). Deep sensor fusion between 2D laser scanner and IMU for mobile robot localization. *Sensors*, 21(6), 8501–8509. <https://doi.org/10.3390/s21248501>
 - Baranov, O. O., Rudenko, N. V., & Shyrokyi, Yu. V. (2021). *Matematychni osnovy robototekhnichnykh system: navch. posib.* [Mathematical foundations of robotic systems: A tutorial]. National Aerospace University "Kharkiv Aviation Institute".
 - Chen, W., Shang, G., Ji, A., Zhou, C., Wang, X., Xu, C., Li, Z., & Hu, K. (2022). SLAM overview: From single sensor to heterogeneous fusion. *Remote Sensing*, 14(23), Article 5933. <https://doi.org/10.3390/rs14235933>
 - Al-Tawil, B., El-Khalil, A., & Ahmad, M. (2024). A review of visual SLAM for robotics: Evolution, properties, and future applications. *Frontiers in Robotics and AI*, 11, Article 1341050. <https://doi.org/10.3389/frobt.2024.1341050>

10. Shyrokyi, Yu. V., Sysoiev, Yu. O., Semenenko, Yu. O., et al. (2025). Doslidzhennia kinematychnykh kharakterystyk delta-robotu v zadachakh priamoj ta zvorotnoi kinematyky [Research of kinematic characteristics of a delta robot in problems of forward and inverse kinematics]. *Vidkryti informatsiini ta kompiuterni intehrovani tekhnolohii* [Open Information and Computer Integrated Technologies], (106), 121–141.
11. Karamanos, X. (2023). Mobile industrial robotic vehicles: Navigation with visual SLAM methodologies. In *Advances in Service and Industrial Robotics*. IntechOpen. <https://doi.org/10.5772/intechopen.1136693>
12. Afanasyev, I. (2025). *Comparison of various SLAM systems for mobile robot in an indoor environment*. arXiv. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2501.09490>
13. Semenenko, Yu. O., & Semenenko, O. D. (2025). Analiz mozhlyvosti keruvannia delta-robotom za dopomohoiu PID-rehuliatora [Analysis of the possibility of controlling a delta robot using a PID controller]. In *Tezy 38-i Mizhnar. nauk.-prakt. konf. "Informatsiino-keruiuchi systemy na zaliznychnomu transporti"* (pp. 2–3). UkrDUZT.
14. Alsadik, B., & Karam, S. (2021). The simultaneous localization and mapping (SLAM)—An overview. *Journal of Applied Science and Technology Trends*, 2(2), 147–158. <https://doi.org/10.35882/jastt.v2i2.26>
15. Segura, M. J., Auat Cheein, F. A., Toibero, J. M., Mut, V., & Carelli, R. (2011). Ultra wide-band localization and SLAM: A comparative study for mobile robot navigation. *Sensors*, 11(2), 2035–2055. <https://doi.org/10.3390/s110202035>
16. Cheein, F. A. A., Steiner, G., Perez Paina, G., & Carelli, R. (2011). Optimized EIF-SLAM algorithm for precision agriculture mapping based on stems detection. *Computers and Electronics in Agriculture*, 78(2), 195–207. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2011.07.007>
17. Habich, T. L., Stuede, M., Labbe, M., & Spindeldreier, S. (2021). Have I been here before? Learning to close the loop with LiDAR data in graph-based SLAM. In *Proceedings of the 2021 IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics (AIM)* (pp. 429–434). IEEE. <https://doi.org/10.1109/AIM46487.2021.9517173>
18. Hähnel, D., Burgard, W., & Thrun, S. (2003). Learning compact 3D models of indoor and outdoor environments with a mobile robot. *Robotics and Autonomous Systems*, 44(1), 15–27. [https://doi.org/10.1016/S0921-8890\(03\)00007-1](https://doi.org/10.1016/S0921-8890(03)00007-1)
19. Bescos, B., Cadena, C., & Neira, J. (2021). Empty cities: A dynamic-object-invariant space for visual SLAM. *IEEE Transactions on Robotics*, 37(2), 433–451. <https://doi.org/10.1109/TRO.2020.3020764>
20. Zhan, H., Weerasekera, C. S., Bian, J. W., & Reid, I. (2020). Visual odometry revisited: What should be learnt? In *Proceedings of the 2020 IEEE*

International Conference on Robotics and Automation (ICRA) (pp. 4203–4210).

IEEE. <https://doi.org/10.1109/ICRA40945.2020.9196667>

21. Myglovets, I., Rudenko, N., Sysoiev, I., & Shyrokyi, Y. (2023). Development of a manipulator for fully automated the process of charging electric vehicles. *Vidkryti informatsiini ta kompiuterni intehrovani tekhnolohii* [Open Information and Computer Integrated Technologies], (97), 80–93.

Energy-Efficient Algorithms for Sensor Data Processing in Ground Robotic Systems of Various Applications

The article examines the application of simultaneous localization and mapping (SLAM) methods to ensure autonomous navigation of mobile robots in unknown environments. The relevance of the study is driven by the need to develop highly efficient algorithms for processing sensor data in autonomous mobile platforms operating under limited computational resources and in the absence of external navigation infrastructure. These challenges are particularly significant in the Ukrainian context, especially in the development of ground-based robotic systems for territory inspection, infrastructure monitoring, demining operations, emergency response, and operation at industrial facilities. Approaches to filtering laser rangefinder data in mobile robot navigation systems are analyzed. Traditionally, SLAM problems employ methods based on the Kalman filter and its modifications — the Extended Kalman Filter (EKF) and the Unscented Kalman Filter (UKF). However, the EKF algorithm requires linearization of nonlinear models, which leads to a loss of accuracy, while the UKF provides better estimation consistency but is characterized by increased computational complexity. This limits their effectiveness for autonomous robots with constrained hardware resources. An alternative is the GP-RTSS filtering algorithm based on Gaussian processes, which does not require linearization, numerical integration, or explicit model sample prediction. This approach provides higher state estimation accuracy and adaptability to various types of dynamic systems. At the same time, a significant limitation of GP-RTSS is the high computational cost associated with evaluating the kernel function.

The paper investigates a modification of the DIS RTSS filter that implements a distributed computing scheme within the GP-RTSS framework in order to reduce processing time and memory usage. Four distributed computing algorithms are proposed: DIS RTP, DIS RTGP, DIS RTB, and DIS RTrB. Simulation results show that the DIS RTGP algorithm demonstrates the best balance between computational efficiency and accuracy for autonomous mobile robot navigation tasks. The obtained results can be used in the development of domestic robotic systems with enhanced autonomy and energy efficiency.

Keywords: autonomous mobile robots, path planning, SLAM, algorithm, sensors, navigation, Gaussian process, filtering algorithm, DIS RTSS algorithm, DIS RTP algorithm, DIS RTGP algorithm, DIS RTB algorithm, DIS RTrB algorithm.

Відомості про авторів:

Семененко Юрій Олександрович, кандидат технічних наук, доцент кафедри електроенергетики, електротехніки та електромеханіки, Український державний університет залізничного транспорту, м. Харків, Україна. semenenko_jo@kart.edu.ua. ORCID: [0000-0001-9422-3528](https://orcid.org/0000-0001-9422-3528).

Сисоєв Юрій Олександрович, д-р техн. наук, старш. наук. співроб, проф. каф. теоретичної механіки, машинознавства та роботомеханічних систем, Національний аерокосмічний університет «Харківський авіаційний інститут», Харків, Україна. ORCID: 0000-0001-5006-8546.

Семененко Ольга Діонісівна, асист. каф. теоретичної механіки, машинознавства та роботомеханічних систем, Національний аерокосмічний університет «Харківський авіаційний інститут». o.semenenko@khai.edu. ORCID: [0009-0001-8425-562X](https://orcid.org/0009-0001-8425-562X).

Степаненко Денис Романович, старший викладач кафедри теоретичної механіки, машинознавства та роботомеханічних систем, Національний аерокосмічний університет «Харківський авіаційний інститут» м. Харків, Україна. D.Stepanenko@khai.edu. ORCID: 0000-0002-6765-096X.

Сорока Анастасія Сергіївна, студентка кафедри теоретичної механіки, машинознавства та роботомеханічних систем, Національний аерокосмічний університет «Харківський авіаційний інститут» м. Харків, Україна. a.soroka@student.khai.edu. ORCID: 0009-0005-3166-4621.

Широкий Юрій Вячеславович, кандидат технічних наук, доцент кафедри теоретичної механіки, машинознавства та роботомеханічних систем, Національний аерокосмічний університет «Харківський авіаційний інститут» м. Харків, Україна. i.shyrokyi@khai.edu. ORCID: 0000-0002-4713-0334.

About the Author:

Semenenko Yurii Oleksandrovych, Doctor of Philosophy, Associate Professor of the Department of Electrical Power Engineering, Electrical Engineering and Electromechanics, Ukrainian State University of Railway Transport, Kharkiv, Ukraine. semenenko_jo@kart.edu.ua. ORCID iD: 0000-0001-9422-3528.

Sysoiev Iurii, Doctor of Technical Sciences, Professor of Department of Theoretical Mechanics, Engineering and Robotic Systems, National Aerospace University «Kharkiv Aviation Institute», Kharkiv, Ukraine. E-mail: i.sysoiev@khai.edu. ORCID: 0000-0001-5006-8546, Scopus Author ID: 55886163000.

Semenenko Olha Dionisiivna, Assistant at the Department of Theoretical Mechanics, Machine Science and Robotic Mechanical Systems, National Aerospace University «Kharkiv Aviation Institute». o.semenenko@khai.edu. ORCID iD: [0009-0001-8425-562X](https://orcid.org/0009-0001-8425-562X).

Stepanenko Denys, Senior Lecturer of Department of Theoretical Mechanics, Engineering and Robomechanical Systems, National Aerospace University «Kharkov Aviation Institute», Kharkov, Ukraine, D.Stepanenko@khai.edu. ORCID: 0000-0002-6765-096X.

Soroka Anastasiya Serhiivna, Student of the Department of Theoretical Mechanics, Mechanical Engineering and Robotic Mechanical Systems, National Aerospace University «Kharkiv Aviation Institute», Kharkiv, Ukraine. a.soroka@student.khai.edu. ORCID: 0009-0005-3166-4621.

Shyrokyi Yurii Vyacheslavovich, Doctor of Philosophy, Assistant-Professor, Head of Department of Theoretical Mechanics, Engineering and Robomechanical Systems, National Aerospace University «Kharkiv Aviation Institute», Kharkiv, Ukraine. i.shyrokyi@khai.edu; ORCID: 0000-0002-4713-0334.

Стаття надійшла 17.04.26

Стаття прийнята до друку після рецензування 14.05.26

Стаття опублікована (оприлюднена) 29.05.26

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

ХІСМАТУЛІН В. Ш., кандидат технічних наук, професор, професор кафедри автоматизації та комп'ютерного телекерування рухом поїздів Українського державного університету залізничного транспорту

САГАЙДАЧНИЙ В. Г., аспірант кафедри автоматизації та комп'ютерного телекерування рухом поїздів Українського державного університету залізничного транспорту

ПЕЛЕХ В. Р., аспірант кафедри автоматизації та комп'ютерного телекерування рухом поїздів Українського державного університету залізничного транспорту

Обґрунтування інтервалу оновлення координатної інформації про стан рухомих одиниць у координатних системах регулювання

У системах координатного регулювання руху поїздів із рухомими блок-ділянками важливе місце займають операції, пов'язані з отриманням та обробкою координатної інформації – визначення координати голови і довжини поїзда, розрахунок допустимої швидкості руху поїзда до хвоста попереду розташованого поїзда.

Проведено спектральний аналіз складових руху поїзда, обумовлених керуючими діями машиніста за звичайного (планового) руху та інших випадкових факторів. За результатами аналізу встановлено, що спектр флуктуацій випадкового процесу, обумовленого діями машиніста, зосереджений у вузькій області частот, а флуктуації від інших факторів мають широкий спектр і меншу спектральну потужність. Тому з використанням широкого спектра, що має місце за великої частоти оновлення інформації, «вага» корисних складових буде зменшуватися порівняно з флуктуаційними. Отже, для того щоб з обробкою координатної інформації враховувати лише розподіл спектральних складових, обумовлених діями машиніста, частота оновлення інформації має бути такою, щоб забезпечити відновлення тільки основної частини спектра прискорення. Наведено співвідношення, яке, відповідно до умов теореми відліків, пов'язує значення частоти оновлення інформації з постійною часу кореляції прискорення, що обумовлено керуючими діями машиніста (середнє значення інтервалу часу руху з постійним прискоренням).

Наведені оцінки періоду та частоти оновлення координатної інформації можна використовувати лише в планових (нормальних) ситуаціях. Це пояснюють тим, що лінійні алгоритми Калмана є інерційними з «пам'яттю» характеру руху, тривалість якої визначена величиною постійної часу зміни прискорень. Наявність «пам'яті» надзвичайно корисна тим, що лінійні алгоритми дають, по-перше, змогу проводити екстраполяцію руху об'єкта і поїзної ситуації на відповідний часовий інтервал і передбачати можливі дії з її регулювання; по-друге, завдяки наявності інерційності можливе продовження роботи системи керування за короткочасного викривлення або зникнення вимірювань.

Однак лінійні алгоритми не забезпечують миттєву реакцію системи керування рухом поїздів із виникненням надзвичайних ситуацій (аварія, різке гальмування або прискорення). Тому необхідно, щоб у надзвичайних ситуаціях використовували методи екстреного оцінювання стану рухомих одиниць – спеціальні нелінійні алгоритми, засновані на теорії ухвалення рішень, а між рухомими одиницями підтримувати відстань, достатню для запобігання аварійним ситуаціям.

Ключові слова: координатні системи регулювання, кореляційна функція прискорень, спектральна щільність, частота оновлення інформації, теорема відліків, лінійний алгоритм оцінювання стану.

Вступ.

Перспективні методи керування рухом залізничного транспорту передбачають використання координатної інформації про рухомі одиниці [1, 2], щоб реалізувати координатні способи регулювання руху на основі визначення місця розташування поїздів, їхньої швидкості і прискорення. Тому в системах координатного регулювання з рухомими блок-ділянками важливе місце займають операції, пов'язані з отриманням та обробкою координатної інформації – визначення координати голови та довжини поїзда,

©ХІСМАТУЛІН В. Ш., САГАЙДАЧНИЙ В. Г., ПЕЛЕХ В. Р., 2026

розрахунок допустимої швидкості руху поїзда до хвоста попереду розташованого поїзда. Однією з проблем побудови системи обробки координатної інформації в центрі керування є визначення частоти або інтервалу часу оновлення інформації, необхідної для формування команд керування.

Мета.

Метою роботи є визначення вимог щодо частоти оновлення координатної інформації в центрі керування, яка допомагає забезпечити ефективну роботу алгоритмів оцінювання параметрів руху в координатних системах регулювання руху поїздів.

Основний матеріал.

Координатна інформація може бути отримана з використанням супутникових систем навігації, локомотивних засобів контролю і точкових колійних датчиків або баліз (balise) у системі ETCS-3. У всіх цих випадках у центрі керування необхідно проводити статистичну обробку первинних даних, одержуваних від різних джерел інформації, для оцінювання координат стану, їх екстраполяції та формування команд керування рухомими одиницями [1-3].

Для проведення аналізу скористаємося статистичною моделлю руху об'єкта, заснованою на гіпотезі, що ділянки рівномірного руху, прискорення або гальмування поїздів змінюються апіорі в невідомий спосіб [4, 5]. Такий підхід обумовлений тим, що рух об'єкта заздалегідь точно не визначений і може змінюватися непередбачувано. Отже, модель руху поїзда базована на його статистичних характеристиках.

У роботі [5] детально проаналізовано статистичні характеристики руху поїзда. Показано, що прискорення $w(t)$, обумовлене керуючими діями машиніста для звичайного (планового) руху, можна вважати випадковим процесом з експоненційною кореляційною функцією

$$\Gamma_w(\tau) = \sigma_w^2 \exp(-|\tau|/\tau_w), \quad (1)$$

де σ_w - середньоквадратичне значення прискорення;

τ_w - постійна часу кореляції прискорення, що обумовлене керуючими діями машиніста (середнє значення інтервалу часу руху з постійним прискоренням).

Вказані параметри можна визначити за результатами обробки статистичної інформації для кожного типу поїзда і ділянки [4, 5].

На підставі статистичної моделі прискорень (1) будують лінійні дискретні алгоритми оцінювання та екстраполяції координатної інформації [6, 7]. Для їхнього синтезу користуються параметрами моделі прискорень у дискретному часі $t_n = nT$:

$$w(nT) = \rho \cdot w(nT - T) + q \cdot \xi(nT), \quad (2)$$

де T - інтервал часу дискретизації - період оновлення інформації;

$\rho = \exp(-T/\tau_w)$ - параметр, який характеризує ступінь кореляції прискорення на інтервалі часу T ;

$q = 1 - \rho^2$ - параметр, що характеризує невизначену складову прискорення на інтервалі часу дискретизації;

$\xi(nT)$ - послідовність некорельованих випадкових величин (шум збудження), розподілених за нормальним законом з одиничною дисперсією.

Отже, не тільки середньоквадратичне значення σ_w і постійна часу кореляції прискорення τ_w , а і величина інтервалу часу дискретизації T є одним із важливих параметрів алгоритмів обробки інформації. Вона є оберненою до частоти оновлення інформації F : $F = 1/T$. Зрозуміло, що збільшення частоти оновлення дає змогу забезпечити більш надійний контроль за поїзною ситуацією, але потребує суттєвого збільшення ресурсів від системи керування. Тому з'ясуємо, які вимоги потрібно враховувати, вибираючи її. Розглянемо це питання через спектральний аналіз складу прискорень з урахуванням додаткових факторів, що визначають рух поїзда.

Як відомо [6], спектральна щільність розподілу флуктуацій прискорення, обумовленого керуючими діями машиніста, яка є перетворенням Фур'є кореляційної функції (1), визначена виразом

$$S_w(\omega) = \frac{2\sigma_w^2\tau_k}{1 + \tau_k^2\omega^2}, \quad (3)$$

де ω - кругова (циклічна) частота, рад/с.

Крім прискорення, обумовленого керуючими діями машиніста, завжди присутні додаткові флуктуаційні складові $w_f(t)$, які залежать від нерівностей шляху, коливань колісних пар та інших факторів, що впливають на рух поїзда. Ці складові накладені на основний рух, але не впливають суттєво на його основний характер або компенсовані діями машиніста. Тому можна вважати, що флуктуаційні складові руху мають математичне сподівання, що дорівнює нулю. На підставі статистичного аналізу флуктуаційну складову прискорення можна вважати випадковим процесом з експоненційною кореляційною функцією, аналогічною (1), із середньоквадратичним відхиленням σ_f і постійною

часу кореляції τ_f , яка суттєво менша за постійну часу

τ_w . Результуючий графік зміни прискорення в часі з урахуванням обох складових показано на рис. 1.

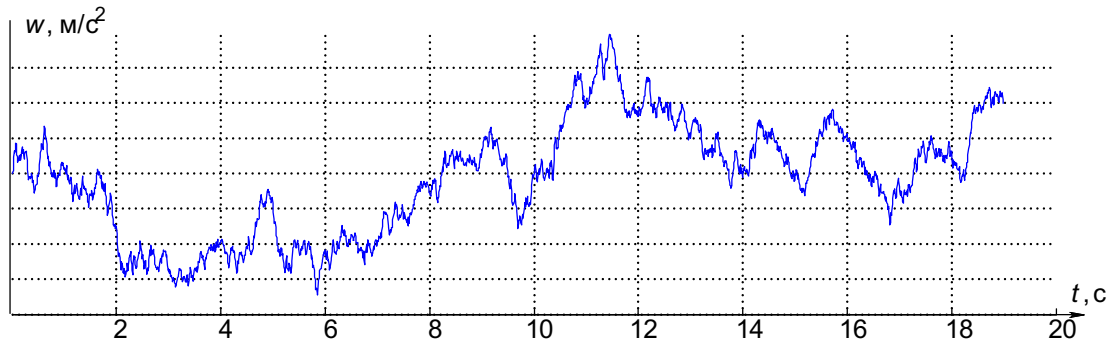


Рис. 1. Результуючий графік зміни прискорення в часі

Типові графіки кореляційної функції $\Gamma(\tau)$ і спектральної щільності $S(\omega)$ прискорення за постійної часу кореляції $\tau_k = 2$ с (коректування руху машиністом) і $0,2$ с (флуктуаційні складові) наведені на рис. 2. Як бачимо, спектр флуктуацій випадкового процесу, обумовленого діями машиніста, зосереджені у вузькій області частот поблизу $\omega = 0$, а флуктуації від інших факторів мають широкий спектр і меншу спектральну потужність в області низьких

частот. Тому з обробкою інформації із застосуванням широкого спектра, що має місце за великої частоти дискретизації, «енергія» флуктуаційних складових буде пропорційно збільшуватися, а корисна інформація практично не додана. Отже, для того щоб з обробкою координатної інформації враховувати лише розподіл спектральних складових, обумовлених діями машиніста, частота оновлення інформації має бути такою, щоб забезпечити відновлення тільки основної частини спектра прискорення.

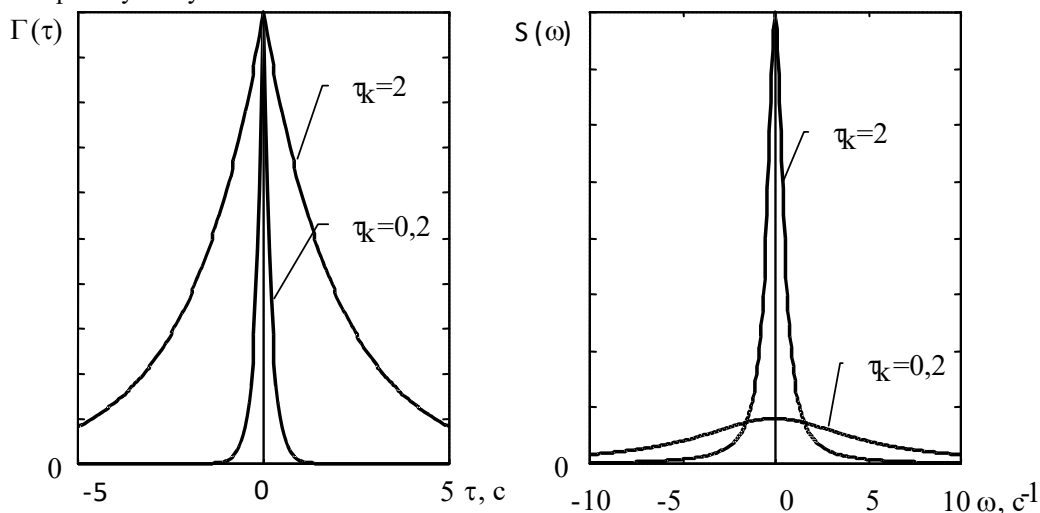


Рис. 2. Графіки кореляційної функції

$\Gamma(\tau)$ і спектральної щільності $S(\omega)$ флуктуацій для різних постійних часу кореляції τ_k

Будемо вважати, що розподіл основних спектральних складових прискорення, обумовленого діями машиніста, зосереджений в області частот $(-\omega_{\max}, \omega_{\max})$ вище заданого порогового рівня δ відносно максимального значення $S_w(0) = 2\sigma_w^2\tau_w$:

$$\frac{1}{1 + (\omega_{\max} \cdot \tau_w)^2} = \delta. \tag{4}$$

Тоді основна ширина спектра $F_{\max} = 2\pi\omega_{\max}$, Гц, буде задовольняти умову

$$F_{\max} = \frac{1}{2\pi \cdot \tau_w} \sqrt{\frac{1-\delta}{\delta}}. \tag{5}$$

ІНФОРМАЦІЙНО-КЕРУЮЧІ СИСТЕМИ НА ЗАЛІЗНИЧНОМУ ТРАНСПОРТІ

Відповідно до умов теореми відліків (Найквіста-Шеннона-Котельникова), для забезпечення можливості відновлення неперервного сигналу за дискретними вимірами період часової дискретизації T має задовольняти вимогу

$$T < 1/2F_{\max}, \quad (6)$$

З урахуванням виразу (5) отримуємо, що інтервал часу T оновлення координатної інформації визначений нерівністю

$$T < \pi \cdot \tau_w / \sqrt{\frac{1-\delta}{\delta}}. \quad (7)$$

За планового руху величина τ_w середнього значення інтервалу часу руху з постійним прискоренням складає від одиниць до десятків секунд [5]. Відповідно, для забезпечення достатньої якості оцінювання параметрів руху у звичайних ситуаціях період оновлення координатної інформації доцільно вибирати в межах 1-10 с.

Зазначимо, що величина порога δ впливає на припустимий рівень втрат інформації за швидких змін прискорень, обумовлених діями машиніста. Наприклад, зі зменшенням порога від 0,1 до 0,01 мінімальна частота оновлення інформації збільшується втричі – від $1/\tau_w$ до $3/\tau_w$, що дає змогу більш точно спостерігати рух поїзда на малих часових інтервалах. Зрозуміло, що платою за це є зростання рівня флуктуаційної складової, обумовленої дією додаткових факторів і збільшення навантаження на обчислювальні засоби.

Безумовно, наведені оцінки періоду і частоти оновлення координатної інформації можна використовувати лише в планових (нормальних) ситуаціях. Це пояснюють тим, що лінійні алгоритми Калмана, розглянуті у статті [7], є інерційними з «пам'яттю» характеру руху, тривалість якої визначена величиною постійної часу τ_w [6]. Наявність «пам'яті» надзвичайно корисна тим, що лінійні алгоритми дають, по-перше, змогу проводити екстраполяцію руху об'єкта і поїзної ситуації на відповідний часовий інтервал і передбачати можливі дії з її регулювання; по-друге, завдяки наявності інерційності можливе продовження роботи системи керування за короткочасного викривлення або зникнення вимірювань.

Однак лінійні алгоритми, засновані на моделі (1), не забезпечують миттєву реакцію системи керування рухом поїздів із виникненням надзвичайних ситуацій (аварія, різке гальмування або прискорення). Тому необхідно в надзвичайних ситуаціях використовувати методи екстреного оцінювання стану рухомих

одиниць – спеціальні нелінійні алгоритми, засновані на теорії ухвалення рішень, а між рухомими одиницями підтримувати відстань, достатню для запобігання аварійним ситуаціям [8-10].

Список використаних джерел

1. European Train Control System. URL: <https://www.thalesgroup.com/en/european-train-control-system-etcs23>
2. When will we see ETCS Level 3 train control systems? URL: <https://www.arcweb.com/industry-best-practices/when-will-we-see-etcs-level-3-train-control-systems>
3. Хісматулін В. Ш., Сагайдачний В. Г., Пелех В. Р. Порівняльна характеристика та проблеми побудови координатних систем регулювання рухом поїздів. *Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті*. 2024. № 4. С. 49-54.
4. Singer R. Estimating optimal tracking filter performance for manned maneuvering targets. *IEEE Trans. Aerospace & Electronic Systems*. July 1970. Vol. AES-6. P. 473-483.
5. Бойнік А. Б., Хісматулін В. Ш., Воліченко І. Г. Модель руху транспортного засобу для синтезу лінійного алгоритму оцінки координатної інформації. *Збірник наукових праць ДонІЗТ*. Донецьк, 2013. Вип. 36. С. 63-67.
6. Sage A. P., Melse J. L. *Estimation Theory with Application to Communication and Control*. N.-Y : McGraw-Hill, 1972.
7. Хісматулін В. Ш., Воліченко І. Г. Оптимальний лінійний алгоритм оцінювання координат стану рухомої одиниці. *Збірник наукових праць ДонІЗТ*. Донецьк, 2014. Вип. 37. С. 10-14.
8. Federated Data-Driven Kalman Filtering for State Estimation/ November 2024. DOI: [10.48550/arXiv.2411.05847](https://doi.org/10.48550/arXiv.2411.05847)
9. Unscented Filtering and Nonlinear Estimation/ Simon J. Julier, Jeffrey K. Uhlmann. *Proceedings of the IEEE*. March 2004. Vol. 92, No. 3. P. 401-422.
10. Punithakumar K. Nonlinear filtering algorithms for multitarget tracking. *McMaster University*, 2007. P. 153. References

1. *European Train Control System*. (n.d.). Thales Group. <https://www.thalesgroup.com/en/european-train-control-system-etcs23>
2. ARC Advisory Group. (n.d.). *When will we see ETCS Level 3 train control systems?* <https://www.arcweb.com/industry-best-practices/when-will-we-see-etcs-level-3-train-control-systems>
3. Khismatulin, V. Sh., Sahaidachnyi, V. H., & Pelekh, V. R. (2024). Porivnialna kharakterystyka ta problemy pobudovy koordynatnykh system rehulivannia rukhom poizdiv [Comparative characteristics and problems of building coordinate systems for train traffic control]. *Informatsiino-keruiuchi systemy na zaliznychnomu*

- transporti*[Information and Control Systems on Railway Transport], (4), 49–54.
4. Singer, R. (1970). Estimating optimal tracking filter performance for manned maneuvering targets. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, AES-6(4), 473–483. <https://doi.org/10.1109/TAES.1970.310128>
 5. Boinik, A. B., Khismatulin, V. Sh., & Volichenko, I. H. (2013). Model rukhu transportnoho zasobu dlia syntezy liniinoho alhorytmu otsinky koordynatnoi informatsii [A vehicle motion model for the synthesis of a linear algorithm for estimating coordinate information]. *Zbirnyk naukovykh prats DonIZT* [Collection of Scientific Papers of DonIRT], (36), 63–67.
 6. Sage, A. P., & Melsa, J. L. (1971). *Estimation theory with applications to communications and control*. McGraw-Hill.
 7. Khismatulin, V. Sh., & Volichenko, I. H. (2014). Optymalni liniyni alhorytm otsiniuvannia koordynat stanu rukhomoi odyntsi [Optimal linear algorithm for estimating the coordinates of the state of a moving unit]. *Zbirnyk naukovykh prats DonIZT* [Collection of Scientific Papers of DonIRT], (37), 10–14.
 8. Gao, S., & Li, W. (2024). *Federated data-driven Kalman filtering for state estimation*. arXiv. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2411.05847>
 9. Julier, S. J., & Uhlmann, J. K. (2004). Unscented filtering and nonlinear estimation. *Proceedings of the IEEE*, 92(3), 401–422. <https://doi.org/10.1109/JPROC.2003.823141>
 10. Punithakumar, K. (2007). *Nonlinear filtering algorithms for multitarget tracking* [Doctoral dissertation, McMaster University]. McMaster University Digital Commons.
- with a high frequency of information updates, the «weight» of useful components decreases in comparison to fluctuation components. Consequently, in order to process coordinate information while considering only the spectral components caused by the driver's actions, the frequency of information updates should be set to ensure the reconstruction of only the main part of the acceleration spectrum. A formula is provided that, in accordance with the conditions of the sampling theorem, relates the update frequency to the time constant of acceleration correlation, which is determined by the driver's control actions (the average time interval of movement with constant acceleration). The estimated update period and frequency of coordinate information can only be used in planned (normal) situations. This is because Kalman linear algorithms are inertial and have a «memory» of the movement characteristics, the duration of which is determined by the time constant of acceleration changes. The presence of such «memory» is highly beneficial as it allows, first, for the extrapolation of the object's movement and the train situation over a corresponding time interval, predicting possible control actions. Second, thanks to inertia, the control system can continue functioning even in cases of short-term distortions or loss of measurements. However, linear algorithms do not ensure an immediate response of the train control system in emergency situations (accidents, sudden braking, or acceleration). Therefore, in emergencies, rapid state assessment methods should be used—special nonlinear algorithms based on decision-making theory. Additionally, a sufficient distance should be maintained between moving units to prevent emergency situations.
- Keywords:** coordinate control systems, acceleration correlation function, spectral density, information update frequency, sampling theorem, linear state estimation algorithm.

Khismatulin V., Sagaidachnyi V., Pelekh V. Justification of the update interval of coordinate information about the state of moving units in coordinate control systems

In train movement coordinate control systems with moving block sections, operations related to obtaining and processing coordinate information play an important role—determining the position of the train's head and its length, as well as calculating the permissible speed of the train relative to the end of the preceding train.

A spectral analysis was conducted on the components of train movement, which are influenced by the driver's control actions during normal (planned) movement, as well as by other random factors. The analysis results show that the fluctuation spectrum of the random process caused by the driver's actions is concentrated within a narrow frequency range, whereas fluctuations from other factors have a broader spectrum and lower spectral power. Therefore, when using a wide spectrum, which occurs

Хісмадулін Володимир Шайдуллович, кандидат технічних наук, професор, професор кафедри автоматики та комп'ютерного телекерування рухом поїздів, Український державний університет залізничного транспорту, м. Харків, Україна.

<https://orcid.org/0000-0001-7578-1217>.

E-mail: khisvs@kart.edu.ua.

Сагайдачний Владислав Геннадійович, аспірант кафедри автоматики та комп'ютерного телекерування рухом поїздів, Український державний університет залізничного транспорту, м. Харків, Україна.

<https://orcid.org/0000-0003-2511-9852>.

E-mail: v.sahaidachnyi@kart.edu.ua.

Пелех Володимир Романович, аспірант кафедри автоматики та комп'ютерного телекерування рухом поїздів, Український державний університет залізничного транспорту, м. Харків, Україна.

<https://orcid.org/0009-0000-3201-4632>.

E-mail: vpeleh@gmail.com.

Khismatulin Volodymyr, Ph.D., professor, professor of the Department of automatic and computer remove control of train traffic, Ukrainian State University of Railway Transport, Kharkiv, Ukraine.

<https://orcid.org/0000-0001-7578-1217>.

E-mail: khisvs@kart.edu.ua.

Sahaidachnyi Vladyslav, postgraduate Department of automatic and computer remove control of train traffic, Ukrainian State University of Railway Transport, Kharkiv, Ukraine.

<https://orcid.org/0000-0003-2511-9852>.

E-mail: v.sahaidachnyi@kart.edu.ua.

Pelekh Volodymyr, postgraduate Department of automatic and computer remove control of train traffic, Ukrainian State University of Railway Transport, Kharkiv, Ukraine.

<https://orcid.org/0009-0000-3201-4632>.

E-mail: vpeleh@gmail.com.

Стаття надійшла 02.02.26

Стаття прийнята до друку після рецензування
14.04.26

Стаття опублікована (оприлюднена) 29.05.26

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

ШЕВЧЕНКО В. І., к.т.н., доцент,
МАЦІЄВСЬКИЙ Б. В., аспірант,
СУМЕЦЬ М. С., магістрант

Розроблення окремих положень до «Інструкції про порядок передачі вантажних вагонів в оренду» і «Порядку проведення електронних торгів з оренди рухомого складу»

Анотація. У статті досліджено проблему гармонізації відомчого нормативно-правового регулювання оренди вантажних вагонів із чинним законодавством про оренду державного та комунального майна. На підставі порівняльно-правового аналізу виявлено п'ять груп невідповідностей «Інструкції про порядок передачі вантажних вагонів в оренду» (наказ № 151 у редакції Наказу Міністерства інфраструктури № 931 від 18.11.2013 р.) вимогам Закону України № 157-IX і Порядку КМУ № 483. Визначено основні колізії: некоректне визначення суб'єктів орендних відносин, застарілий механізм відбору орендаря, застосування скасованої методики розрахунку орендної плати і відсутність положень про воєнний стан. Запропоновано оновлені редакції основних положень Інструкції та розроблено проєкт галузевого «Порядку проведення електронних торгів з оренди рухомого складу», адаптованого до платформи Prozorro.Продажі. Обґрунтовано доцільність затвердження цих документів як нормативних актів АТ «Укрзалізниця».

Ключові слова: оренда державного майна, вантажні вагони, рухомий склад, електронні аукціони, Prozorro.Продажі, АТ «Укрзалізниця», нормативно-правове регулювання, Порядок № 483.

Вступ.

Реформування системи управління державним майном в Україні спричинило принципові зміни у правовому регулюванні орендних відносин. Ухвалення Закону України «Про оренду державного та комунального майна» від 03.10.2019 р. № 157-IX запровадило якісно нову модель оренди, що ґрунтовано на засадах прозорості, конкуренції та обов'язкового використання електронної торгової системи [1]. Її практична реалізація забезпечена Порядком передавання в оренду державного та комунального майна, затвердженим Постановою Кабінету Міністрів України від 03.06.2020 р. № 483 [2], який детально регламентує весь процес — від формування переліку об'єктів до укладення договору оренди.

Водночас у сфері залізничного транспорту продовжує бути застосовуваною «Інструкція про порядок передачі вантажних вагонів в оренду», затверджена Наказом Міністерства транспорту України № 151 у редакції Наказу Міністерства інфраструктури № 931 від 18.11.2013 р. [5], яку розробляли за чинним попереднім законодавством. Невідповідність між галузевою нормативною базою та загальним законодавством об'єктивно формує правову невизначеність як для АТ «Укрзалізниця», так і суб'єктів, що прагнуть орендувати вагонний рухомий склад.

Проблема набуває особливої актуальності в контексті воєнного стану. Постанова КМУ від 27.05.2022 р. № 634 [4] запровадила спеціальні механізми оренди державного майна в кризових умовах, проте галузева Інструкція не містить відповідних положень, що ускладнює їх практичне застосування.

© ШЕВЧЕНКО В. І., МАЦІЄВСЬКИЙ Б. В., СУМЕЦЬ М. С., 2026

Дослідники ринку операторів вантажних перевезень звертають увагу на те, що правова прозорість доступу до вагонного парку безпосередньо визначає рівень конкуренції та інвестиційну привабливість галузі [18].

Аналіз останніх досліджень і публікацій.

Питання правового регулювання оренди державного майна в Україні знаходяться в центрі уваги вітчизняної наукової спільноти впродовж останнього десятиліття, однак реформа 2019–2020 рр. відкрила новий виток дискусій щодо практичних механізмів реалізації оновленого законодавства. У працях В. П. Мікловди та І. Г. Брітченка досліджено теоретичні засади гармонізації відомчих нормативних актів із публічно-правовими реформами у сфері управління майном держави; автори наголошують на системному характері колізій між галузевими інструкціями та новими законодавчими конструкціями [11]. Аналітичні огляди Фонду державного майна України фіксують, що впровадження електронних аукціонів на платформі Prozorro.Продажі суттєво підвищило прозорість орендних відносин, однак виявило неготовність ряду балансоутримувачів до роботи в новій системі [10].

Проблематика ринку операторів вантажних перевезень і правові механізми доступу до вагонного парку знайшли відображення в роботах М. В. Коріня, який констатує пряму залежність між рівнем правової визначеності орендних процедур та інвестиційною активністю приватних операторів [18]. Практичні аспекти організації електронних торгів з оренди державного майна висвітлені у виданнях, присвячених новій моделі оренди [8, 9, 12], де детально розглянуто алгоритм роботи з платформою

Prozorro.Продажі і типові помилки організаторів аукціонів. Разом із тим у названих джерелах практично не розглядають специфічні особливості передавання в оренду залізничного рухомого складу — вагонів, що перебувають на балансі АТ «Укрзалізниця», і не пропонують механізм імплементації норм Порядку № 483 у відомчу нормативну базу залізничного транспорту.

Окремі аспекти оренди рухомого складу в умовах воєнного стану частково висвітлені в офіційних повідомленнях Кабінету Міністрів України та аналітичних матеріалах електронних майданчиків [16, 17], проте системного наукового аналізу адаптації галузевих нормативних актів до вимог постанови КМУ № 634 у цих матеріалах не подано. Отже, незважаючи на значний масив публікацій про загальні механізми оренди державного майна, питання комплексної модернізації відомчої «Інструкції про порядок передачі вантажних вагонів в оренду» залишається недостатньо дослідженим, що і визначає актуальність цієї роботи та необхідність вироблення конкретних пропозицій щодо її оновлення.

Метою статті є обґрунтування і формулювання оновлених положень для «Інструкції про порядок передачі вантажних вагонів в оренду» і розроблення проекту «Порядку проведення електронних торгів з оренди рухомого складу», узгоджених із чинним законодавством України.

Для досягнення мети вирішують такі завдання: проаналізувати основні нормативні акти у сфері оренди державного майна в контексті рухомого складу залізниць; порівняти і проаналізувати чинну Інструкцію; виявити основні групи невідповідностей; запропонувати оновлені положення і галузевий порядок проведення електронних торгів; обґрунтувати доцільність їх затвердження як відомчих нормативних актів.

Основна частина дослідження

1. Нормативно-правові засади оренди державного майна та їх застосування до рухомого складу. Закон України № 157-IX [1] кардинально переосмислив архітектуру орендних відносин у публічному секторі. Принциповими новаціями є введення єдиного кола орендодавців, перехід до відкритих переліків об'єктів оренди двох типів і обов'язкове проведення електронних аукціонів через платформу Prozorro.Продажі [14]. Науковці

зазначають, що ці зміни суттєво підвищили конкурентність і прозорість орендних процедур [11], хоча їх імплементація в галузевих нормативних актах залишається нерівномірною.

Порядок № 483 [2] деталізує алгоритм включення об'єктів до переліків, вимоги щодо оголошень про аукціон, порядок реєстрації учасників і формування протоколів за результатами торгів. Аналітичні матеріали ФДМУ свідчать, що стандартизація цих процедур помітно скоротила кількість оскаржень результатів [10].

Методика розрахунку орендної плати за державне майно, затверджена постановою КМУ від 28.04.2021 р. № 630 [3], встановлює базові ставки, порядок індексації та корегувальні коефіцієнти. Її застосування є обов'язковим для визначення стартового розміру орендної плати в оголошеннях про аукціон, що безпосередньо стосується лотів із вагонами АТ «Укрзалізниця».

В умовах воєнного стану постанова КМУ № 634 [4] запровадила спрощені процедури: укладання договорів на коротший строк, відтермінування окремих заходів і особливий режим роботи електронної торгової системи. Ці положення потребують інтеграції до галузевих нормативних документів залізничного транспорту.

Рухомий склад залізниць функціонує в специфічному техніко-правовому середовищі. Статут залізниць України [6] і Правила перевезень вантажів [7] регламентують режим експлуатації вагонів, умови їх передавання між власниками та вимоги щодо технічного стану. Відтак модернізацію Інструкції потрібно здійснювати з урахуванням усього нормативного масиву — від Закону № 157-IX і Порядку № 483 до Методики № 630 і спеціальних норм воєнного часу.

2. Аналіз чинної Інструкції про порядок передавання вантажних вагонів в оренду. «Інструкція про порядок передачі вантажних вагонів в оренду», затверджена наказом № 151 у редакції 2013 р. [5], була сформована за дії попереднього законодавства. Порівняльний аналіз її положень із вимогами Закону № 157-IX і Порядку № 483 дає змогу виокремити п'ять груп невідповідностей (рис. 1).

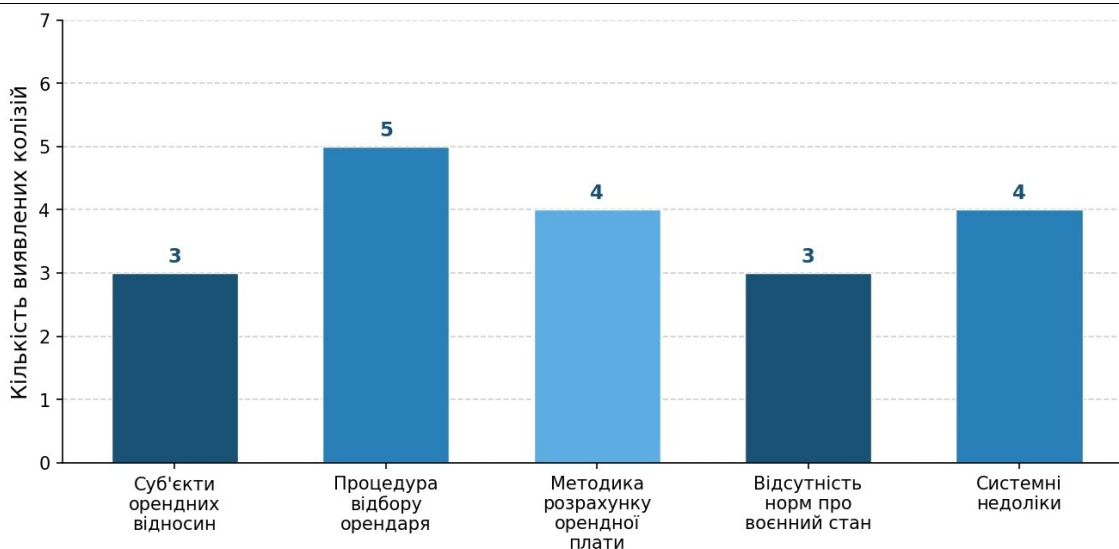


Рис. 1. Розподіл виявлених невідповідностей чинної Інструкції вимогам оновленого законодавства (складено авторами)

2.1. Суб'єкти орендних відносин. У п. 1.3 Інструкції визначено орендодавцями «залізничці та підприємства залізничного транспорту загального користування за погодженням з Укрзалізницею». Такий підхід суперечить положенням Закону № 157-IX, за якими орендодавцем є Фонд державного майна України або уповноважений орган, а підприємство – це виключно балансоутримувач [1]. В умовах корпоратизації АТ «Укрзалізниця» це розмежування набуває принципового значення для визначення прав і обов'язків сторін договору.

2.2. Процедура відбору орендаря. У розд. II Інструкції передбачено розглянути заяви Тарифною комісією та внутрішній «конкурс на право оренди». Такий механізм прямо суперечить вимогам Закону № 157-IX і Порядку № 483, які встановлюють електронний аукціон у системі Prozorro. Продажі основним способом відбору орендаря [2, 14]. Видання аналітиків ринку наголошує, що відомчі конкурсні комісії можуть виконувати лише дорадчу роль [8, 9].

2.3. Фінансові положення. У п. 3.1 Інструкції зроблено посилання на Методику розрахунку орендної плати, затверджену постановою КМУ № 786 від 04.10.1995 р., яку замінено новою Методикою № 630 [3]. Застосування скасованого нормативного акта для розрахунку орендної плати може призвести до невідповідності умов договорів чинному законодавству та претензій контролюючих органів.

2.4. Відсутність норм про воєнний стан. Чинна Інструкція не містить жодних положень про оренду в умовах воєнного стану, попри те що в постанові № 634 [4] запроваджено спеціальні режими: спрощення процедур, можливість перегляду строків та умов договорів тощо. Відсутність галузевої конкретизації ускладнює практичне застосування цих норм у діяльності АТ «Укрзалізниця».

2.5. Системні недоліки. До системних недоліків належать змішування понять «орендна плата» і «провізна плата», що може призводити до підміни орендних зобов'язань транспортними; жорстка регламентація складу підписантів актів приймання-передавання без відсилання до умов конкретного договору; нечіткий розподіл відповідальності за ремонти без узгодження з типовими формами ФДМУ [10, 12].

3. Запропоновані зміни до Інструкції: оновлені положення. На підставі проведеного аналізу обґрунтовано потребу у внесенні комплексних змін за п'ятьма напрямками.

По-перше, у розділі «Загальні положення» необхідно уточнити суб'єктний склад: орендодавцем для вагонів державної власності потрібно визначити ФДМУ або інший орган відповідно до Закону № 157-IX [1], а АТ «Укрзалізниця» закріпити в ролі балансоутримувача; водночас замінити посилання на застарілі нормативні акти відсиланнями до Закону № 157-IX, Порядку № 483, Методики № 630 і Постанови № 634.

По-друге, розділ про порядок укладення договорів потрібно трансформувати так, щоб Тарифна комісія виконувала виключно дорадчу функцію, а основним способом передавання вагонів в оренду став електронний аукціон у системі Prozorro. Продажі відповідно до Порядку № 483 [2, 15].

По-третє, положення про орендну плату необхідно привести у відповідність до Методики № 630 [3], встановивши, що розмір орендної плати визначено договором оренди на основі цієї Методики та роз'яснень ФДМУ, а стартова ставка аукціону розраховано згідно з її вимогами.

По-четверте, до Інструкції доцільно включити окремий пункт щодо застосування особливостей оренди в умовах воєнного стану на підставі постанови № 634 [4], зокрема спрощених

ІНФОРМАЦІЙНО-КЕРУЮЧІ СИСТЕМИ НА ЗАЛІЗНИЧНОМУ ТРАНСПОРТІ

процедур, можливостей перегляду строків та обмежень для передавання стратегічних об'єктів.

По-п'яте, системні положення про акти приймання-передавання, розподіл витрат на ремонти, маркування вагонів і відповідальність сторін мають відсилати до умов договору і типових форм ФДМУ, чітко розмежовувати орендні та перевізні відносини, бути узгодженими із нормами Статуту залізниць [6] і Правил перевезень вантажів [7].

4. Проєкт «Порядку проведення електронних торгів з оренди рухомого складу». Із метою деталізації застосування Порядку № 483 до специфіки рухомого складу розроблено проєкт галузевого «Порядку проведення електронних торгів з оренди рухомого складу». Цей документ покликаний виконати роль нормативного містка між загальнонаціональним механізмом Prozorro.Продажі і техніко-експлуатаційними особливостями вагонного парку АТ «Укрзалізниця», не формуючи альтернативної аукціонної моделі.

У розділі «Загальні положення» встановлено, що Порядок регулює проведення електронних аукціонів з оренди рухомого складу (переважно вантажних вагонів) на балансі АТ «Укрзалізниця»; торги проводять у системі Prozorro.Продажі відповідно до Закону № 157-ІХ і Порядку № 483 [1, 2]; на період воєнного стану застосовують особливості, передбачені Постановою № 634 [4].

Розділ про ініціювання та підготовку до аукціону закріплює можливість ініціативи як із боку

балансоутримувача, так і потенційного орендаря, а також обов'язковість техніко-економічного обґрунтування доцільності передавання рухомого складу в оренду та процедуру включення вагонів до переліків об'єктів оренди [16, 17].

Розділ «Формування лота» конкретизує структуру інформації в оголошенні: технічні характеристики вагонів (тип, рік виготовлення, технічний стан, наявність сертифікатів), балансоутримувач, стартова орендна плата з відсиланням до Методики № 630 [3], проєкт договору оренди з галузевими додатками, обмеження щодо видів вантажів і маршрутів.

Розділи про участь і проведення торгів відтворюють вимоги Порядку № 483 і регламентів Prozorro.Продажі [14] щодо реєстрації учасників, внесення гарантійних внесків, триаундового формату аукціону, формування протоколу. У розділі про укладення договору передбачено його оформлення за типовою формою ФДМУ з галузевими доповненнями.

Заключні розділи про продовження договорів, безаукціонну оренду, моніторинг і звітність відсилають до відповідних норм Закону № 157-ІХ, Порядку № 483 і Постанови № 634 [1, 2, 4], конкретизуючи їх для оренди вагонів. Розподіл трудомісткості основних етапів цього процесу показано на рис. 2.



Рис. 2. Розподіл трудомісткості етапів електронного аукціону з оренди рухомого складу відповідно до Порядку № 483 (складено авторами)

Висновки.

ІНФОРМАЦІЙНО-КЕРУЮЧІ СИСТЕМИ НА ЗАЛІЗНИЧНОМУ ТРАНСПОРТІ

Проведений аналіз підтверджує, що «Інструкція про порядок передачі вантажних вагонів в оренду» суттєво відстає від сучасного законодавчого регулювання орендних відносин: вона зберігає застарілі механізми відбору орендаря, посилається на скасовані нормативні акти, не розмежує ролі орендодавця та балансоутримувача, не враховує особливості воєнного стану. Ця ситуація генерує ризики правової невизначеності для АТ «Укрзалізниця» і її контрагентів.

Запропоновані оновлені положення Інструкції та проєкт «Порядку проведення електронних торгів з оренди рухомого складу» забезпечують системну інтеграцію відомчої нормативної бази із Законом № 157-IX, Порядком № 483, Методикою № 630 і Постановою № 634 [1–4]. Вони дають змогу чітко розмежувати ролі орендодавця та балансоутримувача; закріпити Prozorro.Продажі як єдиний інструмент конкурентного відбору орендарів; урахувати галузеву специфіку технічного обслуговування і обліку вагонного парку; адаптувати орендні процедури до умов воєнного та повоєнного відновлення.

Результати дослідження мають теоретичне та практичне значення. Теоретично вони сприяють формуванню методологічних засад гармонізації відомчих актів із публічно-правовими реформами у сфері управління державним майном, а практично можуть бути використані АТ «Укрзалізниця», Фондом державного майна України та Міністерством інфраструктури для підготовки нових редакцій нормативних документів щодо оренди рухомого складу.

Перспективи подальших досліджень: вивчення впливу прозорих електронних механізмів оренди вагонів на розвиток ринку операторів вантажних перевезень, порівняльно-правовий аналіз із практикою держав — членів ЄС [11].

Список використаних джерел

1. Про оренду державного та комунального майна : Закон України від 03.10.2019 р. № 157-IX / Верховна Рада України. *Відомості Верховної Ради України*. 2020. № 3. Ст. 16. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/157-20> (дата звернення: 10.01.2025).

2. Деякі питання оренди державного та комунального майна [Порядок передачі в оренду державного та комунального майна] : Постанова Кабінету Міністрів України від 03.06.2020 р. № 483. *Офіційний вісник України*. 2020. № 47. Ст. 1482.

3. Методика розрахунку орендної плати за державне майно : Постанова Кабінету Міністрів України від 28.04.2021 р. № 630. *Офіційний вісник України*. 2021. № 37. Ст. 2258.

4. Про деякі питання оренди державного та комунального майна в умовах воєнного стану : Постанова Кабінету Міністрів України від 27.05.2022

р. № 634. *Офіційний вісник України*. 2022. № 47. Ст. 2535.

5. Інструкція про порядок передачі вантажних вагонів в оренду : Наказ Міністерства транспорту України від 19.09.2001 р. № 151 у редакції Наказу Міністерства інфраструктури України від 18.11.2013 р. № 931. Нормативна база АТ «Укрзалізниця».

6. Статут залізниць України : затв. Постановою Кабінету Міністрів України від 06.04.1998 р. № 457. *Офіційний вісник України*. 1998. № 14.

7. Правила перевезень вантажів : затв. Наказом Міністерства транспорту України від 21.11.2000 р. № 644 (із змінами). *Офіційний вісник України*. 2001. № 8.

8. Оренда державного та комунального майна в Україні: нові правила. *Облік і бюджет*. 2025. № 11. С. 12–18.

9. Орендуємо майно за новими правилами. *Balance*. 2020. № 4. С. 6–15.

10. Інформаційна довідка щодо застосування норм Закону України № 157-IX «Про оренду державного та комунального майна» / Фонд державного майна України. Київ, 2021. 48 с.

11. Мікловда В. П., Брітченко І. Г. Правове регулювання оренди державного майна: теорія та практика. *Науковий вісник Ужгородського університету. Серія «Право»*. 2023. Вип. 75. С. 145–152.

12. Прозора оренда — 2020: огляд нової моделі. *Бюджетна бухгалтерія*. 2020. № 27. С. 3–9.

13. Вимоги до оформлення статей у Збірнику наукових праць УкрДУЗТ / Укр. держ. ун-т залізн. трансп. Харків, 2024. URL: <https://www.ukrdzuzt.edu.ua> (дата звернення: 05.01.2025).

14. Платформа Prozorro.Продажі: розділ «Аукціони з оренди». URL: <https://prozorro.sale/uk> (дата звернення: 08.01.2025).

15. Як організувати аукціон з оренди державного майна. ProZakupivli. 2024. URL: <https://prozakupivli.com.ua> (дата звернення: 09.01.2025).

16. Укрзалізниця здаватиме вагони в оренду через Prozorro.Продажі : офіційне повідомлення КМУ. 2021. URL: <https://www.kmu.gov.ua> (дата звернення: 10.01.2025).

17. Оренда рухомого складу АТ «Укрзалізниця» через Prozorro.Продажі : аналітичні матеріали електронного майданчика. (місто)2023. 12 с.

18. Корінь М. В. Ринок операторів вантажних перевезень: розвиток та використання вагонного парку в умовах реформування. 36. наук. праць Укр. держ. ун-ту залізнич. трансп. Харків: УкрДУЗТ, 2022. Вип. 196. С. 88–97.

19. ДСТУ 8302:2015. Інформація та документація. Бібліографічне посилання. Загальні положення та правила складання. Київ : ДП «УкрНДНЦ», 2016. 16 с.

References

1. Verkhovna Rada of Ukraine. (2019). Pro orendu derzhavnoho ta komunalnoho maina [On the lease of state and municipal property] (Law of Ukraine No. 157-IX). *Vidomosti Verkhovnoi Rady Ukrainy*, 2020(3), Article 16. <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/157-20>
2. Cabinet of Ministers of Ukraine. (2020). Deiaki pytannia orendy derzhavnoho ta komunalnoho maina [Poriadok peredachi v orendu derzhavnoho ta komunalnoho maina] [Some issues of leasing state and municipal property [Procedure for leasing state and municipal property]] (Resolution No. 483). *Ofitsiyni Visnyk Ukrainy*, (47), Article 1482.
3. Cabinet of Ministers of Ukraine. (2021). Metodyka rozrakhunku orendnoi platy za derzhavne maino [Methodology for calculating rent for state property] (Resolution No. 630). *Ofitsiyni Visnyk Ukrainy*, (37), Article 2258.
4. Cabinet of Ministers of Ukraine. (2022). Pro deiaki pytannia orendy derzhavnoho ta komunalnoho maina v umovakh voiennoho stanu [On some issues of leasing state and municipal property under martial law] (Resolution No. 634). *Ofitsiyni Visnyk Ukrainy*, (47), Article 2535.
5. Ministry of Transport of Ukraine. (2001). Instruksiia pro poriadok peredachi vantazhnykh vahoniv v orendu [Instruction on the procedure for leasing freight wagons] (Order No. 151, as amended by Order of the Ministry of Infrastructure of Ukraine No. 931, 2013). *Normatyvna baza AT "Ukrzaliznytsia"*.
6. Cabinet of Ministers of Ukraine. (1998). Statut zaliznyts Ukrainy [Charter of the railways of Ukraine] (Approved by Resolution No. 457). *Ofitsiyni Visnyk Ukrainy*, (14).
7. Ministry of Transport of Ukraine. (2000). Pravyla perevezen vantazhiv [Rules for the transport of goods] (Approved by Order No. 644, with amendments). *Ofitsiyni Visnyk Ukrainy*, 2001(8).
8. Orenda derzhavnoho ta komunalnoho maina v Ukraini: Novi pravyla [Lease of state and municipal property in Ukraine: New rules]. (2025). *Oblik i biudzhety*, (11), 12–18.
9. Orenduiemo maino za novymy pravylamy [Leasing property under the new rules]. (2020). *Balance*, (4), 6–15.
10. State Property Fund of Ukraine. (2021). *Informatsiina dovidka shchodo zastosuvannia norm Zakonu Ukrainy No. 157-IX "Pro orendu derzhavnoho ta komunalnoho maina"* [Information note on the application of the norms of the Law of Ukraine No. 157-IX "On the lease of state and municipal property"].
11. Miklovda, V. P., & Britchenko, I. H. (2023). Pravove rehuliuвання orendy derzhavnoho maina: Teoriia ta praktyka [Legal regulation of state property lease: Theory and practice]. *Naukovyi visnyk Uzhhorodskoho universytetu. Seriia "Pravo"*, (75), 145–152.
12. Prozora orenda — 2020: Ohliad novoi modeli [Transparent lease — 2020: Overview of the new model]. (2020). *Biudzhetsna buhgalteriia*, (27), 3–9.
13. Ukrainian State University of Railway Transport. (2024). *Vymohy do oformlennia statei u Zbirnyku naukovykh prats UkrDUZT* [Requirements for formatting articles in the Collection of Scientific Papers of UkrSURT]. <https://www.ukrdzuzt.edu.ua>
14. Prozorro.Sale. (n.d.). *Platforma Prozorro.Prodazhi: Rozdil "Auktsiony z orendy"* [Prozorro.Sale platform: Section "Lease auctions"]. Retrieved January 8, 2025, from <https://prozorro.sale/uk>
15. Yak orhanizuvaty auktsion z orendy derzhavnoho maina [How to organize an auction for the lease of state property]. (2024). *ProZakupivli*. <https://prozakupivli.com.ua>
16. Cabinet of Ministers of Ukraine. (2021). *Ukrzaliznytsia zdavatyme vahony v orendu cherez Prozorro.Prodazhi: Ofitsiine povidomlennia KMU* [Ukrzaliznytsia will lease wagons through Prozorro.Sale: Official notification of the CMU]. <https://www.kmu.gov.ua>
17. *Orenda rukhomoho skladu AT "Ukrzaliznytsia" cherez Prozorro.Prodazhi: Analitychni materialy elektronnoho maidanchyka* [Lease of rolling stock of JSC "Ukrzaliznytsia" through Prozorro.Sale: Analytical materials of the electronic platform]. (2023).
18. Korin, M. V. (2022). Rynok operatoriv vantazhnykh perevezen: Rozvytok ta vykorystannia vahonnoho parku v umovakh reformuvannia [Freight operators market: Development and use of the wagon fleet under reform conditions]. *Zbirnyk naukovykh prats Ukrainського derzhavnoho universytetu zaliznychnoho transportu*, (196), 88–97.
19. State Enterprise "UkrNDNC". (2016). *Informatsiia ta dokumentatsiia. Bibliohrafichne posylannia. Zahalni polozhennia ta pravyla skladannia* [Information and documentation. Bibliographic reference. General principles and rules of composition] (DSTU 8302:2015).

Shevchenko V., Matsievskiy B., Sumets M. Development of specific provisions to the «Instructions on the procedure for the transfer of freight wagons for rent» and the «Procedure for conducting electronic bids for the rent of rolling stock».

Abstract. The article examines the problem of harmonising departmental regulatory norms governing the lease of freight wagons with the current Ukrainian legislation on the lease of state and municipal property.

The relevance of the study is determined by the continued application of the Instructions on the procedure for leasing freight wagons (Order of the Ministry of Transport of Ukraine No. 151 as amended by Order of the Ministry of Infrastructure No. 931 of 18.11.2013), which were developed under the previous legislative framework and have not been brought into conformity with the fundamental reform of 2019–2020. Through a systematic comparative legal analysis, five groups of inconsistencies are identified between the Instructions and the requirements of the Law of Ukraine «On the lease of state and municipal property» No. 157-IX and the Procedure for the lease of state and municipal property approved by Cabinet of Ministers Resolution No. 483. The principal conflicts established are: an incorrect definition of the parties to lease relations (failure to distinguish between the lessor and the balance-holder), an outdated internal lessee selection mechanism that bypasses the mandatory Prozorro.Sales electronic auction system, application of a repealed rent calculation methodology (Resolution No. 786 of 1995 instead of the current Methodology No. 630 of 2021), the absence of provisions governing lease arrangements under martial law conditions as required by Cabinet Resolution No. 634 of 2022, and a number of systemic terminological and procedural shortcomings. Updated versions of the key clauses of the Instructions are proposed, ensuring clear delineation of the roles of the lessor (the State Property Fund of Ukraine) and the balance-holder (JSC Ukrzaliznytsia), and integrating the Prozorro.Sales platform as the primary competitive selection tool. Additionally, a draft sectoral Procedure for conducting electronic auctions for the lease of rolling stock has been developed. This document serves as a normative bridge between the national Prozorro.Sales mechanism and the technical and operational specifics of JSC Ukrzaliznytsia's wagon fleet, detailing the stages of lot formation, auction announcement, participant registration, the three-round bidding process, contract conclusion, and performance monitoring. The expediency of approving these documents as internal regulatory acts of JSC Ukrzaliznytsia is substantiated, with a view to enhancing legal certainty, improving the efficiency of rolling stock utilisation, and adapting lease procedures to both wartime and post-war recovery conditions.

Keywords: state property lease, freight wagons, rolling stock, electronic auctions, Prozorro.Sales, JSC Ukrzaliznytsia, regulatory framework, Procedure No. 483.

Стаття надійшла 26.03.26

Стаття прийнята до друку після рецензування 30.04.26

Стаття опублікована (оприлюднена) 29.05.26

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

Проф. ЛОМОТЬКО Д. В.¹,Доц. ІЛЬЧИШИН В. М.²,доц. ГРУНИК І. С.²,асп. СЕРГЄЄВ В. С.¹,асп. НЕСТЕРЕНКО О. О.¹¹Український державний університет залізничного транспорту²Національний університет «Львівська політехніка»

Удосконалення функціонування прикордонного залізничного вузла через стохастичне моделювання на основі мереж петрі

Стаття присвячена дослідженню технологічних процесів прикордонних залізничних вузлів в умовах передавання вантажів між коліями 1520 і 1435 мм. Метою роботи є розроблення комплексної стохастичної моделі оптимізації роботи прикордонної станції для скорочення сукупних витрат (ТСО) і тривалості технологічного циклу за умов нерівномірного надходження поїздів.

Завдання вирішено із застосуванням апарату ієрархічних мереж Петрі (HPN), що дало змогу декомпонувати систему на три рівні: вузла, деталізації технологічних підмереж (заміна ходових візків L1, перевантаження вантажів L2) та управління ресурсами. Стохастична складова процесів урахувана через затримки за законами Ерланга та нормального розподілу. Економічна компонента ґрунтована на критерії ТСО з урахуванням капітальних і операційних витрат.

Побудовано комплексну ієрархічну модель, верифіковану на даних станції Мостиська-II із похибкою до 4,2 %. Проведено порівняльний аналіз трьох прикордонних напрямків: польського (Медика/Мостиська), угорського (Захонь/Чоп) і словацького (Ціерна/Чіерна-над-Тисоу). Встановлено, що критичне «вузьке місце» для польського переходу — митні пости (чутливість 0,68); для угорського — одночасно митниця та домкратні стійла (0,61/0,52); для словацького — виключно домкратне господарство (0,57). Застосування методу ідеальної точки дало змогу знизити ТСО на 16–19 %. Наукова новизна полягає у вдосконаленні математичного опису взаємодії технічних засобів вузла через інтеграцію економічних показників безпосередньо у структуру мережі Петрі.

Ключові слова: залізничний прикордонний вузол, ієрархічні мережі Петрі, стохастична оптимізація, сукупна вартість володіння (ТСО), перевалка вантажів, заміна залізничних візків, мультимодальні перевезення, логістичний ланцюг, залізничний транспорт.

Вступ

Динамічна перебудова логістичних маршрутів України в процесі євроінтеграції та тривалого воєнного стану суттєво впливає на завантаження прикордонних залізничних переходів. Вітчизняні виробничо-транспортні логістичні ланцюги (ВТЛЛ) стикаються з технічним бар'єром, зумовленим різницею стандартів ширини колії — 1520 мм (простір УЗ) і 1435 мм (простір ЄС), що перетворює прикордонні станції на «вузькі місця» усієї транспортної системи [1]. У контексті глобальних логістичних ланцюгів мультимодальні перевезення займають провідні позиції, де надійність доставлення в основному визначена безперебійністю вузлових операцій. Проте саме в місцях стику різних видів транспорту — портах, термінальних комплексах і міждержавних переходах — сконцентровані основні операційні ризики [2]. Розрахункові методи, що базовані на детермінованій основі, не спроможні коректно врахувати нерівномірність надходження поїздів, варіативність тривалості митних процедур та особливості технології перетину кордону, що

призводить до необґрунтованого зростання сукупних витрат (Total Cost of Ownership, TCO) протягом усього життєвого циклу.

Аналіз попередніх наукових напрацювань

Питання розроблення технологічних моделей залізничних прикордонних переходів порушено в роботах [3-5]. Класичні підходи ґрунтовані на аналітичних розрахункових формулах, які задовільно працюють в умовах стабільних потоків, однак дають суттєві відхилення за умов нерівномірного трафіка. У джерелі [6] описано імітаційну модель залізничної станції разом із програмним забезпеченням для визначення її техніко-експлуатаційних показників.

У роботі [7] розглянуто шляхи підвищення ефективності процедури передавання вантажів через кордони України. Запропоновано методи удосконалення технологій митного контролю та оформлення вантажів, які виконують на прикордонних передавальних станціях.

У статті [8] запропоновано модель змішаного програмування з двоконтурним генетичним алгоритмом для планування швидкісного контейнерного сполучення в умовах інтермодальних

© ЛОМОТЬКО Д. В., ІЛЬЧИШИН В. М., ГРУНИК І. С., СЕРГЄЄВ В. С., НЕСТЕРЕНКО О. О., 2026

перевезень із застосуванням принципів робастної оптимізації. Дослідження [9] присвячено застосуванню апарату мереж Петрі для моделювання технологічних ліній обробки пасажирських поїздів в Україні.

У наукових публікаціях [10-12] обґрунтовано доцільність застосування кольорових та ієрархічних мереж Петрі (CPN) для формального опису складних логічних взаємозалежностей у багаторівневих, зокрема залізничних, системах. Роботу [13] присвячено моделюванню залізничного об'єкта засобами мереж Петрі з демонстрацією можливостей розширеного аналізу результатів у галузі транспортної логістики. У дослідженні [14] проблему перерозподілу залізничного руху в умовах надзвичайних ситуацій формалізовано у вигляді мережі Петрі; у роботі [15] проаналізовано надійність і доступність залізничних систем засобами CPN.

Проведений аналіз свідчить про відсутність комплексного інструменту, який би поєднував переваги ієрархічних мереж Петрі CPN із повноцінною оптимізацією TCO і адаптацією до

специфіки залізничних прикордонних вузлів різних напрямків.

Мета та завдання дослідження

Метою дослідження є удосконалення функціонування прикордонного залізничного вузла через розроблення комплексної стохастичної моделі оптимізації технологічних процесів на основі апарату ієрархічних мереж Петрі, формалізація технології у вигляді орієнтованого ієрархічного графа, верифікація отриманих результатів і побудова прототипу системи підтримки ухвалення рішень (СППР) для оперативного персоналу залізничних переходів.

Основна частина

На сучасні обсяги вантажних перевезень залізничним транспортом впливає комплекс чинників: наявність логістичної інфраструктури, режим воєнного стану, особливості технології роботи прикордонних переходів тощо. Найменш чутливими до якості інфраструктури прикордонних вузлів є контейнерні перевезення (рис. 1, [16]).

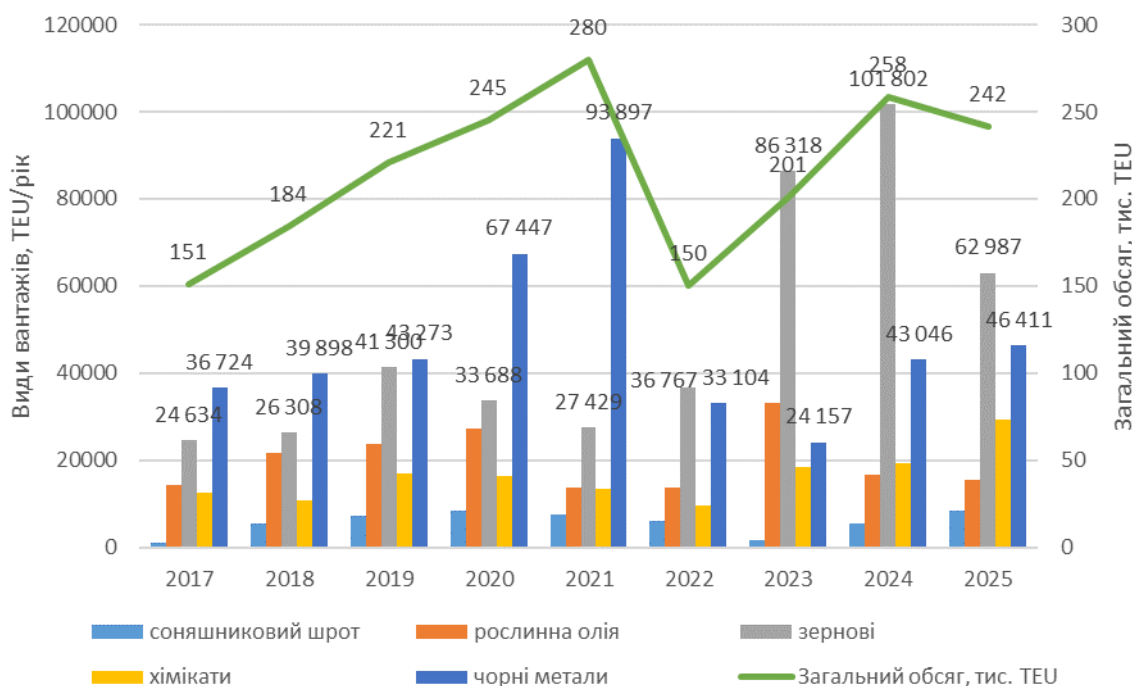


Рис. 1. Динаміка вантажних перевезень залізничним транспортом за видами вантажів, TEU

Об'єкт моделювання – це типовий прикордонний залізничний вузол, серцевиною якого є станція, що здійснює переміщення вагонів і вантажів за наявності колій різної ширини (1520/1435 мм) і з виконанням митних процедур. Виокремлено такі основні технологічні вузли:

- домкратна лінія L1 (вузол J): підіймання вагонів домкратами з подальшою заміною візків — застосовують переважно для масових вантажів;

- кранова лінія L2 (вузол K): перевантаження вантажів кранами — для контейнерів і пакетованих вантажів підвищеної вартості;

- локомотивне обслуговування (вузол L): виконання маневрових операцій із подавання та прибирання рухомого складу;

- митне оформлення (вузол M): проведення документального та фізичного контролю вантажів.

Кольорові ієрархічні мережі Петрі (CPN) являють собою потужний математичний інструментарій для моделювання складних

ІНФОРМАЦІЙНО-КЕРУЮЧІ СИСТЕМИ НА ЗАЛІЗНИЧНОМУ ТРАНСПОРТІ

паралельних систем із ресурсними обмеженнями [2]. Вхідні параметри моделі описано кортежем

$$I = \{\Lambda, R, E, \Theta\}, \quad (1)$$

який охоплює:

- параметри стохастичного потоку (Λ):
 - $\lambda(t)$ — інтенсивність прибуття поїздів (поїзд/год), що враховує добову нерівномірність;
 - CV_a, CV_s — коефіцієнти варіації інтервалів прибуття і часу обслуговування (показники неритмічності);
 - N_{wag} — довжина состава (кількість вагонів), що визначає тривалість маневрових операцій;
 - α — коефіцієнт розподілу потоку: частка поїздів, що спрямовують на кранове перевантаження (технологічна лінія L2), відносно перестановки візків (технологічна лінія L1);
- ресурсні параметри (R):
 - N_{cus} — кількість постів/бригад митного огляду;
 - N_{loco} — кількість маневрових локомотивів у пулі (депо) станції;
 - N_{jack} — кількість технологічних стійл на дільниці заміни візків;
 - N_{crane} — кількість працюючих кранових одиниць;
- економічні та часові параметри (E, Θ):
 - C_{capex}, C_{opex} — капітальні та операційні (експлуатаційні) витрати на одиницю техніки;
 - C_{pen} — вартість однієї вагоно-години простою (Penalty cost);
 - T_{norm} — нормативний час обробки поїзда згідно з технологічним процесом.

Математична основа моделі описана кортежем [17]:

$$HCPN = (P, T, A, \Sigma, V, C, G, E, I), \quad (2)$$

- де P (позиції) — стани накопичення;
- T (переходи) — технологічні операції;
- A (дуги) — логічні залежності;
- Σ (кольори) — типи даних маркерів;
- G (умови-охоронці) — логічні обмеження активації переходів;

E (вирази дуг) — забезпечують маршрутизацією з коефіцієнтом α , наприклад, якщо вантаж визначено як контейнерний, вираз дуги спрямовує маркер до черги до технологічної лінії L2 P_{Wait_L2} .

Індивідуальний час очікування для кожного k -го маркера (поїзда) $W_{q,k}$, що проходить через позицію

черги $j \in \{Customs, Shunting, L1, L2\}$, фіксований:

$$W_{q,k,j} = \int_{T_{in,k,j}}^{T_{out,k,j}} 1 dt = T_{out,k,j} - T_{in,k,j}, \quad (3)$$

де T_{in} — мітка часу входження в чергу; T_{out} — мітка часу активації обслуговування.

Тоді інтегральна оцінка завантаження може бути реалізована як сумарний час очікування в системі, що формує непродуктивні (штрафні) витрати, розраховують як накопичену тривалість довжини черги

$$W_{total}(t) = \sum_{j=1}^m \int_0^T L_j(t) dt, \quad (4)$$

де $L_j(t)$ — кількість маркерів у позиції P_{Queue_j} у момент t . Цей підхід допомагає виявити «пікові» періоди, коли черга зростає експоненціально через збіг випадкових чинників.

Багатокритеріальну оптимізацію проводять для вектора X методом ідеальної точки

$$X = \{N_{cus}, N_{loco}, N_{jk}, N_{cr}, \alpha\}. \quad (5)$$

Оптимізація здійснювана в системі економічного F_1 і технологічного F_2 критеріїв. Економічний критерій пов'язаний із мінімізацією загальних приведених витрат життєвого циклу (TCO)

$$F_1(X) = \sum_i (C_{capex} \cdot r + C_{opex} \cdot i) + (C_{pen} \cdot W_{total}(X)) \rightarrow \min \quad (6)$$

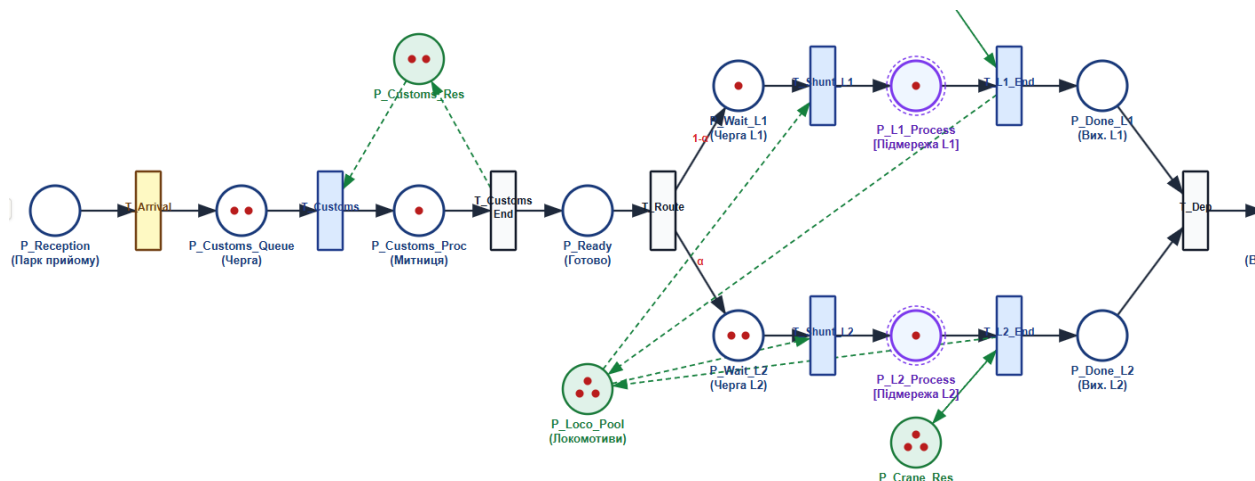
Технологічний критерій — це мінімізація середнього часу обігу (Cycle Time)

$$F_2(X) = \frac{1}{K} \sum_{k=1}^K T_{cycle,k} \rightarrow \min. \quad (7)$$

Компромісне рішення X^* знаходять методом ідеальної точки через нормовану евклідову відстань:

$$\Phi(X) = \sqrt{w_1 \left(\frac{F_1(X) - F_1^{min}}{F_1^{max} - F_1^{min}} \right)^2 + w_2 \left(\frac{F_2(X) - F_2^{min}}{F_2^{max} - F_2^{min}} \right)^2} \quad (8)$$

Укрупнений граф ієрархічної CPN-моделі прикордонного залізничного вузла наведено на рис. 2.



Легенда

- Позиція — стан системи
 - Позиція підмережі
 - Ресурсна позиція
 - Маркер (токен)
 - Перехід з часом
 - Миттєвий перехід
 - Стохастичний перехід
 - Звичайна дуга
 - Ресурсна дуга
- L1 — домкратна лінія (заміна візків)
 L2 — кранова лінія (контейнери)

Верхній рівень ієрархії CPN охоплює такі позиції: P_Reception (Парк приймання) – початкова точка входу поїздів у систему; P_Customs_Queue (Черга на митницю) – накопичення поїздів перед митним оглядом; P_Customs_Process (Митний огляд) – процес проходження митного контролю; P_Ready (Готово до обробки) – поїзди після митниці, готові до маршрутизації; P_Wait_L1 (Черга на L1) – поїзди, що очікують обробку на домкратній лінії; P_Wait_L2 (Черга на L2) – поїзди, що очікують обробку на крановій лінії; P_L1_Process (Домкратна лінія) – [підмережа L1] – процес заміни візків; P_L2_Process (Кранова лінія) – [підмережа L2] – процес перевантаження; P_Departure (Парк відправлення) – готові поїзди для відправлення.

Ресурсні позиції: P_Customs_Resource – кількість митних постів (N_{cus}); P_Loco_Pool – пул маневрових локомотивів (N_{loco}); P_Jack_Resource – кількість домкратних стійл (N_{jack}); P_Crane_Resource – кількість кранових одиниць (N_{crane}).

Переходи (Transitions): T_Arrival (стохастичний) – прибуття поїздів з інтенсивністю $\lambda(t)$; T_Customs (часовий) – процес митного огляду; T_Customs_End (миттєвий) – завершення митного огляду; T_Route (миттєвий) – маршрутизація з коефіцієнтом α ($\alpha \rightarrow$ на L2, тобто контейнери, крани, $1-\alpha \rightarrow$ на L1, це масові вантажі, візки); T_Shunt_L1 (часовий) – подавання на домкратну лінію; T_Shunt_L2 (часовий) – подавання на кранову лінію; T_L1_Process (часовий) – обробка на L1 (розгортається в підмережу); T_L2_Process (часовий) – обробка на L2 (розгортається в підмережу); T_Departure (миттєвий) – відправлення поїзда.

Граф підмережі L1 (домкратна лінія, заміна візків 1520→1435 мм) наведено на рис. 3.

Рис. 2. Укрупнений граф ієрархічної кольорової мережі Петрі прикордонного залізничного вузла (верхній рівень ієрархії)

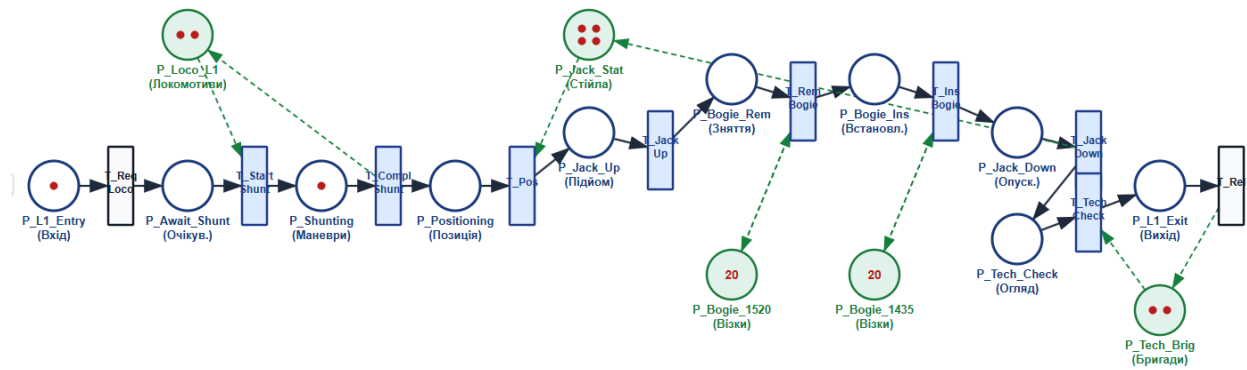


Рис. 3. Граф домкратної лінії ієрархічної CPN (підмережа L1, P_L1_Process — процес заміни ходових візків)

Підмережа L1 реалізує повний цикл заміни ходових візків: вхід → запит локомотива → маневри → позиціонування на стійло → підймання домкратами → демонтаж візків 1520 (із поверненням

у пул) → монтаж візків 1435 (з пулу) → опускання → технічний огляд → вихід. Забезпечена циркуляція запасів візків обох типів.

Граф підмережі L2 (кранова лінія, перевантаження) наведено на рис. 4.

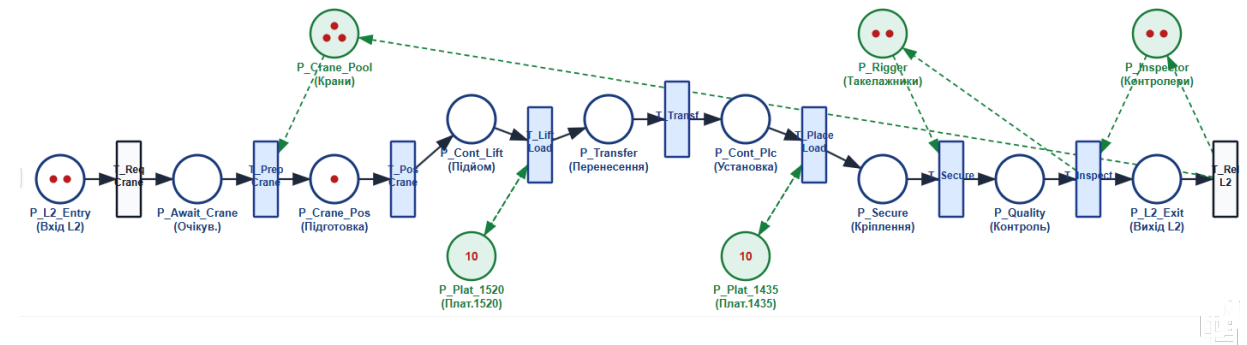


Рис. 4. Граф кранової лінії ієрархічної CPN (підмережа L2, P_L2_Process — процес перевантаження)

Підмережа L2 реалізує повний цикл перевантаження: вхід → запит крана → підготовка та позиціонування крана → підймання вантажу з платформи 1520 → перенесення над коліями → укладання на платформу 1435 → кріплення такелажною бригадою → контроль якості → вихід із вивільненням крана і контролера.

В ієрархічній мережі Петрі основні принципи недискримінаційного доступу до залізничної інфраструктури може бути реалізовано через Arc Expressions (вирази на дугах) і Guard Conditions (умови переходів). Наприклад, перехід, що відповідає за пропускання через митницю ($T_{Customs}$), має вибирати маркери з черги $P_{Customs_queue}$ за принципом FIFO (першим прийшов — першим обслужений) або за ваговим коефіцієнтом пріоритету, який є однаковим для всіх учасників, що забезпечує реалізацію недискримінаційного доступу.

Верифікація моделі здійснювана через контроль збереження потоку маркерів:

$$\sum Token_{in} = \sum Token_{out} + \sum Token_{inside} \quad (9)$$

Оцінюють адекватність (валідацію) порівнянням результатів моделювання з ретроспективними даними станції за 2024 рік із застосуванням критерію Фішера (модель адекватна, якщо $F_{розр} < F_{табл.}$, рівень значущості 0,05). Точність, за методом Монте-Карло, (кількість циклів $N = 1000$)

$$\epsilon = z \cdot \frac{\sigma}{\sqrt{N}}, \quad (10)$$

де z — квантиль стандартного нормального розподілу;

σ — стандартне відхилення.

Для підтвердження точності моделі проведено порівняння з натурними даними станції Мостиська-II (табл. 1). За рівнем значущості $\alpha = 0,05$ і $N = 1000$ ітерацій максимальна похибка не перевищує 4,2 %, що свідчить про високу надійність моделі та достатність для обґрунтування стратегічних інфраструктурних рішень.

Зіставлення результатів моделювання з натурними спостереженнями (ст. Мостиська-II)

Показник	Дані натурних спостережень	Результати моделювання	Відносна похибка, %
Середній час очікування обробки, год	14,2	14,8	4,2 %
Коефіцієнт завантаженості кранового обладнання	0,72	0,69	4,1 %
Пропускна спроможність, ваг./доба	840	815	2,9 %

Із метою практичного застосування розробленої моделі створено прототип СППР для прикордонних залізничних вузлів (рис. 5).

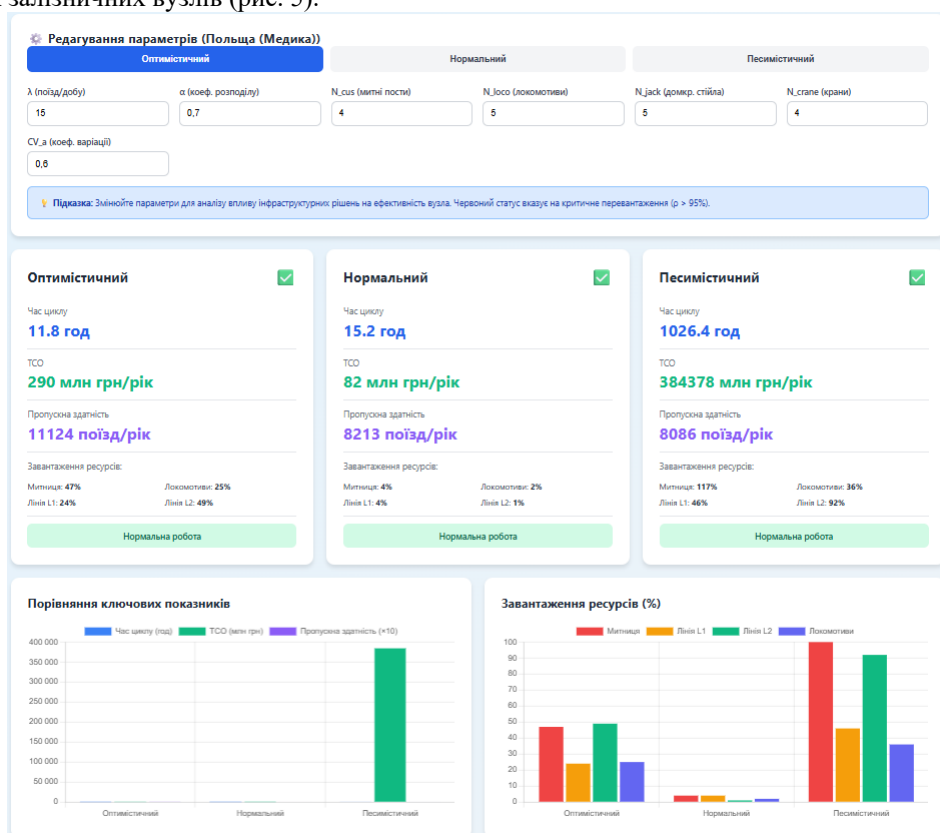


Рис. 5. Інтерфейс прототипу СППР для прикордонних залізничних вузлів

Із метою верифікації та демонстрації практичної цінності розробленої моделі проведено порівняльний аналіз трьох залізничних прикордонних напрямків України: польського (Медика/Мостиська), угорського (Захонь/Чоп) і словацького (Цірна/Чірна-над-Тисоу). Вибір зумовлений суттєвими відмінностями в інтенсивності вантажопотоків, структурі вантажів та рівні технічного оснащення переходів.

Польський напрямок є найбільш завантаженим: висока добова інтенсивність (18–22 поїзд/доба), значна частка контейнерних вантажів ($\alpha = 0,70$),

розвинена інфраструктура з достатнім локомотивним і крановим парками. Угорський напрямок (Чоп — Захонь) має середню інтенсивність (12–16 поїзд/доба) зі збалансованою структурою вантажів: близько 45 % обробляє кран ($\alpha = 0,45$), решта — домкратна лінія. Напрямок має помірне технічне оснащення з тенденцією до нарощування. Словацький напрямок (Цірна/Чірна-над-Тисоу) має нижчу інтенсивність (8–11 поїзд/доба), переважання масових вантажів ($\alpha = 0,30$), обмежений парк маневрових засобів і домкратних стійл, що типово для переходів із меншим товарообігом. Вихідні параметри для чисельного експерименту наведено в табл. 2.

Вхідні параметри порівняльного чисельного експерименту (три напрямки)

Параметр	Позначення	Польща (PL) Медика/Мостиська	Угорщина (HU) Захонь/Чоп	Словаччина (SK) Цірна/Черна
Середня інтенсивність надходження поїздів, поїзд/доба	λ	18–22	12–16	8–11
Коефіцієнт варіації інтервалів прибуття	CVa	0,85	0,70	0,55
Частка вантажів, що переробляє кран, α	α	0,70	0,45	0,30
Кількість діючих митних постів	Ncus	3	2	2
Кількість маневрових локомотивів	Nloco	4	3	2
Кількість домкратних стійл	Njack	6	4	3
Кількість кранових одиниць	Ncrane	4	3	2

На основі 1000 ітерацій симуляції отримано Парето-оптимальні значення TCO і середнього часу технологічного циклу для трьох сценаріїв на кожному напрямку (табл. 3):

- X1 — оптимістичний сценарій (мінімальні інвестиції): мінімальний рівень капіталовкладень за, відповідно, обмежених обсягів роботи;
- X2 — нормальний сценарій (збалансований варіант): збалансовані капітальні витрати за найбільш імовірних обсягів перевезень. Відповідає оптимуму $\Phi(X)$;
- X3 — песимістичний сценарій (максимальне оснащення): значний обсяг роботи потребує суттєвих інвестицій в інфраструктуру.

Таблиця 3

Результати Парето-оптимізації показників технологічних процесів прикордонних залізничних вузлів

Конфігурація ресурсів (X)	TCO, грн/р.	млн	Час технологічного циклу, год	$\Phi(X)$	Питомий TCO, тис. грн/поїзд
Польський напрямок (PL)					
X1 — мінімальні інвестиції	450		38,5	0,82	61,6
X2 — збалансований (оптимум)	320		18,2	0,15	43,8
X3 — максимальне оснащення	580		12,5	0,45	79,5
Угорський напрямок (HU)					
X1 — мінімальні інвестиції	310		32,0	0,74	66,2
X2 — збалансований (оптимум)	220		16,5	0,13	47,1
X3 — максимальне оснащення	395		10,8	0,52	84,2
Словацький напрямок (SK)					

ІНФОРМАЦІЙНО-КЕРУЮЧІ СИСТЕМИ НА ЗАЛІЗНИЧНОМУ ТРАНСПОРТІ

Конфігурація ресурсів (X)	ТСО, млн грн/р.	Час технологічного циклу, год	$\Phi(X)$	Питомий ТСО, тис. грн/поїзд
X1 — мінімальні інвестиції	195	26,0	0,31	59,8
X2 — збалансований (оптимум)	145	13,5	0,11	44,3
X3 — максимальне оснащення	280	9,2	0,88	85,7

Аналіз результатів моделювання дає змогу дійти таких висновків про кожен напрямок:

- польський напрямок (PL): оптимальний сценарій X2 забезпечує ТСО = 320 млн грн/р. за час циклу 18,2 год. Визначальним ресурсним обмеженням є кількість митних постів N_{cus} , коефіцієнт чутливості якого становить 0,68. Висока частка контейнерів ($\alpha = 0,70$) зумовлює домінуюче навантаження на кранову лінію L2, що є нормальним для такого типу вантажопотоку. Перехід до концепції Seamless Border (системи оптичного розпізнавання та ШІ) може суттєво підвищити пропускну спроможність митного вузла;

- угорський напрямок (HU): оптимальний сценарій X2 дає ТСО = 220 млн грн/р. за час циклу 16,5 год. Напрямок демонструє збалансоване навантаження між лініями L1 та L2, що відповідає значенню $\alpha = 0,45$. Критичними обмеженнями є одночасно домкратні стійла (N_{jack} , чутливість 0,61) і

митні пости (N_{cus} , чутливість 0,52). Ефективним заходом є розширення домкратного господарства до п'яти-шести стійл і збільшення N_{cus} до 3;

- словацький напрямок (SK): оптимальний сценарій X2 дає ТСО = 145 млн грн/р. за час циклу 13,5 год — найнижчі абсолютні витрати серед трьох напрямків через меншу інтенсивність. Проте питомий ТСО (44,3 тис. грн/поїзд) залишається конкурентоспроможним. Критичне «вузьке місце» — домкратні стійла (N_{jack} , чутливість 0,57) внаслідок переважання технології L1 (70 % вантажів обробляють зі зміною візків). Рекомендовано нарощувати потужність домкратного господарства або поступову контейнеризацію вантажопотік (збільшення α до 0,45–0,50).

Зведений аналіз вузьких місць і рекомендованих заходів для трьох напрямків наведено в табл. 4.

Таблиця 4

Аналіз критичних ресурсних обмежень і рекомендовані заходи

Напрямок	Критичний ресурс	Коефіцієнт чутливості	Рекомендований захід
Польща (PL)	Митні пости (N_{cus})	0,68	Впровадження систем ОРН та ШІ (Seamless Border)
Угорщина (HU)	Домкратні стійла N_{jack} і митниця N_{cus}	0,61 / 0,52	Розширення домкратного господарства та збільшення N_{cus} до 3
Словаччина (SK)	Домкратні стійла N_{jack}	0,57	Модернізація домкратних потужностей або поступова контейнеризація (збільшення $\uparrow\alpha$)

Порівняння напрямків за методом ідеальної точки підтверджує, що всі три переходи виграють від збалансованого сценарію X2. При цьому структура вузького місця принципово відрізняється: для PL — це митниця (N_{cus}), для HU — комбінація митниці та домкратних стійл, для SK — виключно домкратне господарство. Застосування методу ідеальної точки допомагає знизити ТСО в середньому на 16–19 % порівняно з недооптимальними сценаріями за рахунок раціонального перерозподілу вантажопотоків між лініями L1 та L2.

Висновки

Запропонована модель на базі ієрархічних мереж Петрі забезпечує якісно вищий рівень

технологічної адекватності порівняно з класичними детермінованими аналітичними підходами. Вона дає змогу розраховувати потребу в технічних засобах та інфраструктурі, а також скоординувати роботу митниці, маневрових засобів і вантажних терміналів як єдиної системи.

Верифікація на даних станції Мостиська-II підтвердила точність моделі понад 95 % (максимальна похибка 4,2 %), що є достатнім для стратегічних інфраструктурних рішень. Порівняльний аналіз трьох напрямків виявив принципові відмінності в структурі вузьких місць: польський перехід обмежений митницею (чутливість 0,68), угорський — одночасно домкратним господарством і митницею (0,61/0,52),

ІНФОРМАЦІЙНО-КЕРУЮЧІ СИСТЕМИ НА ЗАЛІЗНИЧНОМУ ТРАНСПОРТІ

словацький — виключно домкратними стійлами (0,57). Застосування методу ідеальної точки дало змогу знизити ТСО орієнтовно на 16–19 % завдяки раціональному перерозподілу вантажопотоків.

Перспективними напрямками вдосконалення для всіх трьох переходів є впровадження концепції «Безшовного кордону» (Seamless Border) із системами оптичного розпізнавання та ШІ; встановлення систем автоматичного зміщення ширини колії (SUW 2000, Talgo, CAF); поступова контейнеризація вантажопотоків на угорському та словацькому напрямках для підвищення частки α і перенесення навантаження з більш трудомісткої лінії L1 на лінію L2.

Універсальна стохастична модель оптимізації прикордонного залізничного вузла на основі ієрархічних мереж Петрі може бути рекомендована як аналітичне ядро СППР залізничних операторів для планування роботи переходів Україна–Польща, Україна–Угорщина та Україна–Словаччина та інших.

Список використаних джерел

1. Ломотко Д. В. Формування транспортного процесу залізниць України на базі логістичних принципів : дис. ...д-ра техн. наук : 05.22.01 – транспортні системи. Харків: УкрДАЗТ, 2008. 384 с. URL: <http://lib.kart.edu.ua/handle/123456789/6787>
2. Ломотко Д. В., Ільчишин В. М., Арсененко Д. В., Ломотко М. Д., Афанасова О. Ф. Стохастичне моделювання залізнично-водних виробничо-транспортних логістичних ланцюгів. *Залізничний транспорт України*. 2025. № 4. С. 4–13. DOI: <https://doi.org/10.34029/2311-4061-2025-157-4-04-13>
3. Бутко Т. В., Ломотко Д. В., Головка Т. В. Удосконалення сумісної роботи портів та залізничних вузлів на основі логістичних методів. *Східно-Європейський журнал передових технологій*. 2007. № 3/6 (27). С. 10–16.
4. Бауліна Г. С. Удосконалення інформаційно-керуючої системи прикордонної передавальної станції на основі застосування інтелектуальних технологій. *Зб. наук. Праць ДонІЗТ*. Донецьк, 2011. Вип. 25. С. 39–44.
5. Нестеренко Г. І., Кузьменко А. І. Удосконалення технології пропуску вантажопотоків через прикордонні передавальні станції. *Вісник Академії митної служби України. Серія «Технічні науки»*. 2011. № 2 (46). С.23–29.
6. Козаченко Д. М., Вернигора Р. В., Коробйова Р. Г. Програмний комплекс для імітаційного моделювання роботи залізничних станцій на основі добового плану-графіка. *Залізничний транспорт України*. 2008. № 4 (70). С. 18–20.
7. Удосконалення технології роботи прикордонної передавальної станції. *Зб. наук. праць Укр. держ. ун-ту залізнич. трансп.* 2015. Вип. 156. С. 106–109. DOI: 10.18664/1994-7852.156.2015.66473
8. Butko T., Parkhomenko L., Prokhorov V., Kalashnikova T., Golovko T. Building a model for planning rapid delivery of containers by rail under the

- conditions of intermodal transportation based on robust optimization. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2022. 5 (3 (119)). 6–16. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2022.265668>
9. Aleshinskiy E., Naumov V., Prymachenko G. Using the Petri nets for forming the technological lines of the passenger trains processing in Ukraine. *Archives of Transport*. 2016. Vol. 38, No. 2. P. 7–15. DOI: <https://doi.org/10.5604/08669546.1218789>
 10. Jensen K., Kristensen L.M. Coloured Petri Nets: Modelling and Validation of Concurrent Systems. Berlin, Heidelberg: Springer, 2009. DOI: 10.1007/b95112
 11. Ricci S., Tieri A. A Petri nets based decision support tool for railway traffic conflicts forecasting and resolution. 2008. P. 483–492. DOI: 10.2495/CR080471
 12. Jensen K., Kristensen L. Colored Petri Nets: A Graphical Language for Formal Modeling and Validation of Concurrent Systems. *Communications of the ACM*. 2015. 58. 61–70. DOI: 10.1145/2663340
 13. Kluge O. Modelling a Railway Crossing with Message Sequence Charts and Petri Nets. LNCS. Springer. 2003. Vol. 2472. P. 197–218. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-540-40022-6_10
 14. Dalapati P., Singh J. A., Dutta A., Bhattacharya S. Multi-agent-based dynamic railway scheduling and optimization: a coloured petri-net model. *Advances in Computational Intelligence*. 2022. Vol. 2, Article 26. DOI: <https://doi.org/10.1007/s43674-022-00039-7>
 15. Song H., Schnieder E. Modeling of railway system maintenance and availability by means of Colored Petri nets. *Eksplatacja i Niezawodnosc*. 2018. 20. 236–243. DOI: 10.17531/ein.2018.2.08
 16. Державна служба статистики України. Статистична інформація «Транспорт». URL: <https://www.ukrstat.gov.ua/>
 17. Genrich H. J., Lautenbach K. System modelling with high-level Petri nets. *Theoretical Computer Science*. 1981. Vol. 13, Iss. 1. P. 109–135. ISSN 0304-3975. [https://doi.org/10.1016/0304-3975\(81\)90113-4](https://doi.org/10.1016/0304-3975(81)90113-4)

References

1. Lomotko, D. V. (2008). *Formuvannia transportnoho protsesu zaliznyts Ukrainy na bazi lohistrychnykh pryncypiv* [Formation of the transport process of Ukrainian railways based on logistics principles] [Doctoral dissertation, Ukrainian State Academy of Railway Transport]. <http://lib.kart.edu.ua/handle/123456789/6787>
2. Lomotko, D. V., Ilchyshyn, V. M., Arsenenko, D. V., Lomotko, M. D., & Afanasova, O. F. (2025). Stokhastychne modeliuвання zaliznychno-vodnykh vyrobnycho-transportnykh lohistrychnykh lantsiuhiv [Stochastic modeling of railway-water production and transport logistics chains]. *Zaliznychnyi*

- transport Ukrainy* [Railway Transport of Ukraine], (4), 4–13. <https://doi.org/10.34029/2311-4061-2025-157-4-04-13>
3. Butko, T. V., Lomotko, D. V., & Holovko, T. V. (2007). Udoskonalennia sumisnoi roboty portiv ta zaliznychnykh vuzliv na osnovi lohistychnykh metodiv [Improvement of joint operation of ports and railway junctions based on logistics methods]. *Skhidno-Yevropeiskyi zhurnal peredovykh tekhnologii* [Eastern-European Journal of Enterprise Technologies], 3/6(27), 10–16.
 4. Baulina, H. S. (2011). Udoskonalennia informatsiino-keruiuchoi systemy prykordonnoi peredavalnoi stantsii na osnovi zastosuvannia intelektualnykh tekhnologii [Improvement of the information and control system of the border transfer station based on the application of intelligent technologies]. *Zbirnyk naukovykh prats DonIZT* [Collection of Scientific Papers of DonIRT], (25), 39–44.
 5. Nesterenko, H. I., & Kuzmenko, A. I. (2011). Udoskonalennia tekhnologii propusku vantazhopotokiv cherez prykordonni peredavalni stantsii [Improvement of the technology of passing cargo flows through border transfer stations]. *Visnyk Akademii mytnoi sluzhby Ukrainy. Seriya "Tekhnichni nauky"* [Bulletin of the Customs Service Academy of Ukraine. Series "Technical Sciences"], (2(46)), 23–29.
 6. Kozachenko, D. M., Vernyhora, R. V., & Korobiova, R. H. (2008). Programnyi kompleks dlia imitatsiinoho modeliuвання roboty zaliznychnykh stantsii na osnovi dobovoho planu-hrafika [A software complex for simulation modeling of railway station operations based on a daily schedule plan]. *Zaliznychnyi transport Ukrainy* [Railway Transport of Ukraine], (4(70)), 18–20.
 7. Udoskonalennia tekhnologii roboty prykordonnoi peredavalnoi stantsii [Improvement of the operation technology of the border transfer station]. (2015). *Zbirnyk naukovykh prats Ukrainського derzhavnoho universytetu zaliznychnoho transportu* [Collection of Scientific Papers of the Ukrainian State University of Railway Transport], (156), 106–109. <https://doi.org/10.18664/1994-7852.156.2015.66473>
 8. Butko, T., Parkhomenko, L., Prokhorov, V., Kalashnikova, T., & Golovko, T. (2022). Building a model for planning rapid delivery of containers by rail under the conditions of intermodal transportation based on robust optimization. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 5(3(119)), 6–16. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2022.265668>
 9. Aleshinskiy, E., Naumov, V., & Prymachenko, G. (2016). Using the Petri nets for forming the technological lines of the passenger trains processing in Ukraine. *Archives of Transport*, 38(2), 7–15. <https://doi.org/10.5604/08669546.1218789>
 10. Jensen, K., & Kristensen, L. M. (2009). *Coloured Petri nets: Modelling and validation of concurrent systems*. Springer. <https://doi.org/10.1007/b95112>
 11. Ricci, S., & Tieri, A. (2008). A Petri nets based decision support tool for railway traffic conflicts forecasting and resolution. *WIT Transactions on The Built Environment*, 103, 483–492. <https://doi.org/10.2495/CR080471>
 12. Jensen, K., & Kristensen, L. (2015). Colored Petri nets: A graphical language for formal modeling and validation of concurrent systems. *Communications of the ACM*, 58, 61–70. <https://doi.org/10.1145/2663340>
 13. Kluge, O. (2003). Modelling a railway crossing with message sequence charts and Petri nets. In *Lecture Notes in Computer Science* (Vol. 2472, pp. 197–218). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-540-40022-6_10
 14. Dalapati, P., Singh, J. A., Dutta, A., & Bhattacharya, S. (2022). Multi-agent-based dynamic railway scheduling and optimization: A coloured petri-net model. *Advances in Computational Intelligence*, 2, Article 26. <https://doi.org/10.1007/s43674-022-00039-7>
 15. Song, H., & Schnieder, E. (2018). Modeling of railway system maintenance and availability by means of Colored Petri nets. *Eksploatacja i Niezawodnosc*, 20, 236–243. <https://doi.org/10.17531/ein.2018.2.08>
 16. State Statistics Service of Ukraine. (n.d.). *Statystychna informatsiia "Transport"* [Statistical information "Transport"]. <https://www.ukrstat.gov.ua/>
 17. Genrich, H. J., & Lautenbach, K. (1981). System modelling with high-level Petri nets. *Theoretical Computer Science*, 13(1), 109–135. [https://doi.org/10.1016/0304-3975\(81\)90113-4](https://doi.org/10.1016/0304-3975(81)90113-4)
- Prof. Lomotko D. V.¹, Assoc. Prof. Ilchysyn V. M.², Assoc. Prof. Grunyk I. S.², Postgraduate Student. Sergeev V. S.¹, Postgraduate Student Nesterenko O. O.¹

IMPROVEMENT OF THE FUNCTIONING OF A BORDER RAILWAY HUBS THROUGH STOCHASTIC MODELING BASED ON PETRI NET

Abstract

This article investigates the technological processes of railway border hubs in the context of freight transshipment between 1520 mm and 1435 mm track gauges. The study develops a comprehensive stochastic optimization model for border station operations aimed at minimizing total costs (TCO) and technological cycle time under non-uniform inbound train flow conditions.

The problem is addressed using the Hierarchical Petri Nets (HPN) framework, enabling system decomposition into three levels: hub level, detailed

ІНФОРМАЦІЙНО-КЕРУЮЧІ СИСТЕМИ НА ЗАЛІЗНИЧНОМУ ТРАНСПОРТІ

technological subnet level (bogie exchange L1, cargo transshipment L2), and resource management level. Stochastic process characteristics are incorporated via Erlang and normal distribution time delays. The economic component is grounded in the Total Cost of Ownership criterion.

A comprehensive hierarchical model was constructed and verified against Mostyska-II station data with an error below 4.2 %. A comparative analysis of three border crossing directions was performed: Poland (Medyka/Mostyska), Hungary (Záhony/Chop), and Slovakia (Čierna nad Tisou/Tsirna). The critical bottleneck for the Polish crossing is customs posts (sensitivity 0.68); for the Hungarian crossing — customs posts and jack stands simultaneously (0.61/0.52); for the Slovak crossing — exclusively jack stands (0.57). The ideal point method reduced TCO by 16–19 %. Scientific novelty lies in the integration of economic indicators directly into the Petri net structure.

A universal stochastic model for optimizing a border railway junction based on hierarchical Petri nets can be recommended as an analytical core of DSS for railway operators for planning the work of crossings Ukraine-Poland, Ukraine-Hungary and Ukraine-Slovakia, and others.

Keywords: railway border hub, hierarchical Petri nets, stochastic optimization, total cost of ownership (TCO), cargo handling, replacement of railway bogies, multimodal transportation, logistics chain, railway transport.

About

Ломотко Денис Вікторович, д.т.н., професор, завідувач кафедри транспортних систем та логістики, Український державний університет залізничного транспорту. Майдан Феєрбаха, 7, Харків, Україна, 61050. E-mail: den@kart.edu.ua. Тел.: +38 067-5760661. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7624-2925>.

Lomotko Denis, Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department of Transport Systems and Logistics, Ukrainian State University of Railway Transport. 7 Feyerbach Square, Kharkiv, Ukraine, 61050. E-mail: den@kart.edu.ua. Tel.: +380 67 576 0661. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7624-2925>.

Ільчишин Василь Михайлович, к.т.н., доцент кафедри залізничного транспорту, Інститут механічної інженерії та транспорту, Національний університет «Львівська політехніка». Вул. Степана Бандери, 12, м. Львів, Україна, 79013. E-mail: Vasyl.M.Ilchyshyn@lpnu.ua. Тел.: +380673100200. ORCID: <https://orcid.org/0009-0001-1207-6825>.

Ilchyshyn Vasyl, Ph.D., Associate Professor, Department of Railway Transport, Institute of Mechanical Engineering and Transport, National University «Lviv Polytechnic». 12 Stepan Bandera Street, Lviv, Ukraine, 79013. E-mail: Vasyl.M.Ilchyshyn@lpnu.ua. Tel.: +380673100200. ORCID: <https://orcid.org/0009-0001-1207-6825>.

Груник Іван Степанович, к.т.н., Львівській фаховий коледж транспортної інфраструктури, доцент кафедри транспортних технологій, Інститут механічної інженерії та транспорту, Національний університет «Львівська політехніка». Вул. Степана Бандери, 12, м. Львів, Україна, 79013. E-mail: gis.grunyk@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0009-0004-6878-2616>.

Grunyk Ivan, PhD, Lviv Professional College of Transport Infrastructure Associate Professor Department of Transport Technologies, Institute of Mechanical Engineering and Transport, National University «Lviv Polytechnic». 12 Stepan Bandera Street, Lviv, Ukraine, 79013. E-mail: gis.grunyk@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0009-0004-6878-2616>.

Сергєєв В'ячеслав Сергійович, аспірант кафедри управління експлуатаційною роботою, Український державний університет залізничного транспорту. ORCID iD: <https://orcid.org/0009-0001-7016-3513>. E-mail: serhieiev_phd@kart.edu.ua.

Serhieiev Viacheslav, postgraduate student, department of operational work management, Ukrainian State University of Railway Transport. ORCID iD: <https://orcid.org/0009-0001-7016-3513>. E-mail: serhieiev_phd@kart.edu.ua.

Нестеренко Олександр Олександрович, аспірант кафедри транспортних систем та логістики, Український державний університет залізничного транспорту. Майдан Феєрбаха, 7, Харків, Україна, 61050. E-mail: nesterenko8@kart.edu.ua. ORCID ID: <https://orcid.org/0009-0007-3688-3684>.

Nesterenko Oleksandr, postgraduate student of the Department of «Transport Systems and Logistics», Ukrainian State University of Railway Transport. Feuerbach Square, 7, Kharkiv, Ukraine, 61050. E-mail: nesterenko8@kart.edu.ua. ORCID ID: <https://orcid.org/0009-0007-3688-3684>.

Стаття надійшла 17.03.26

Стаття прийнята до друку після рецензування 27.04.26

Стаття опублікована (оприлюднена) 29.05.26

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

КИМАН А. М. к.т.н., доцент

ПРОХОРЧЕНКО Г. О., к.т.н., доцент

КРАВЧЕНКО М. А., к.т.н.

(Український державний університет залізничного транспорту)

Розроблення методу інтеграції операційних даних залізничної мережі з графовою структурою плану формування поїздів

Анотація. У статті розроблено метод інтеграції операційних даних функціонування залізничної мережі з графовою структурою плану формування поїздів. Метод спрямований на формування інформаційної основи для аналізу та прогнозування затримок поїздопотоків з урахуванням просторової структури транспортної системи. Для дослідження використано операційні дані АТ «Укрзалізниця» про навантаження вагонів різних номенклатур вантажів та інформацію про простоті кинутих поїздів на станціях полігона мережі регіональної філії «Одеська залізниця». Розроблено процедуру агрегування даних за групами вантажів і видами вагонопотоків і перетворено їх у показники поїздо-годин затримок. Запропоновано алгоритм прив'язки станцій навантаження і станцій затримки до опорних станцій плану формування поїздів із використанням графової моделі залізничної мережі. У результаті сформовано інтегрований набір даних, що поєднує параметри навантаження, маршрути руху вагонопотоків і показники затримок поїздів. Отриманий набір даних може бути використаний як навчальна вибірка для побудови математичних моделей аналізу і прогнозування затримок поїздопотоків у залізничній мережі.

Ключові слова: залізнична мережа, план формування поїздів, графова модель, вагонопотоки, затримки поїздів, прогнозування.

Вступ.

Одним із найбільш чутливих індикаторів ефективності функціонування вантажної залізничної системи є затримки поїздів, що відображають перевантаження окремих елементів мережі та дисбаланс у розподілі вагонопотоків [1]. Традиційні методи аналізу таких процесів здебільшого базовані на локальних показниках роботи залізничних станцій або окремих дільниць, через що не можна повною мірою врахувати просторову структуру руху вагонопотоків у масштабі всієї мережі. У зв'язку з цим особливої актуальності набуває використання мережових підходів, які дають змогу розглядати залізничну систему як складну взаємопов'язану структуру та досліджувати взаємозалежності між її елементами.

Основним нормативним документом, що регулює систему організації вагонопотоків у поїзди, є план формування поїздів (ПФП) [2], який визначає схему консолідації вагонів у поїзди, маршрути їх просування та розподіл технологічних функцій між станціями. Із позицій теорії складних мереж ПФП може бути інтерпретований як графова модель залізничної системи, що можна використати для математичного моделювання прогнозованих затримок поїздопотоків на мережі. Однак для практичного застосування мережових моделей потрібно розв'язати проблему узгодження різнорідних операційних даних із структурою системи організації вагонопотоків. Зокрема, дані про навантаження вагонів, маршрути їх переміщення та фактичні затримки поїздів

сформовані в різних інформаційних масивах і не мають прямої відповідності з графовою структурою ПФП. Це ускладнює використання таких даних для побудови математичних моделей прогнозування.

У зв'язку з цим актуальним науковим завданням є розроблення методу інтеграції операційних даних залізничної мережі з графовою структурою плану формування поїздів, що забезпечує формування узгоджених масивів даних для подальшого моделювання та прогнозування затримок поїздів. Реалізація такого підходу допомагає врахувати просторову структуру руху вагонопотоків, зменшити розмірність вихідних даних і сформувати навчальні вибірки для побудови математичних моделей прогнозування затримок поїздопотоків на мережі.

Аналіз останніх досліджень і публікацій.

Проблема дослідження затримок поїздів є одним із складних завдань. Розв'язуючи цю проблему, складно визначити релевантний набір даних, які можуть бути використані для побудови моделей, що описують складні процеси утворення заторів. Сучасні інформаційні системи залізничного транспорту генерують значні масиви різнорідних операційних даних, що відображають параметри навантаження, маршрути руху вагонопотоків, технологічні операції на станціях і фактичні затримки поїздів. Однак ефективне використання цих даних потребує їх узгодження, агрегування та виявлення статистичних залежностей між характеристиками перевізного процесу і виникненням затримок.

© КИМАН А. М., ПРОХОРЧЕНКО Г. О., КРАВЧЕНКО М. А., 2026

ІНФОРМАЦІЙНО-КЕРУЮЧІ СИСТЕМИ НА ЗАЛІЗНИЧНОМУ ТРАНСПОРТІ

У роботах, присвячених аналізу та прогнозуванню затримок поїздів, можна виділити кілька основних напрямів використання даних і методів їх агрегування та обробки. У більшості досліджень прогнозування затримок ґрунтовано на використанні історичних даних про рух поїздів, які містять інформацію про плановий і фактичний час прибуття і відправлення поїздів [3], величину відхилення від графіка руху [4], а також попередні затримки на станціях або дільницях [5, 6]. Такі дані формують часові ряди експлуатаційних показників, на основі яких будують статистичні, стохастичні або моделі прогнозування на основі машинного навчання. Основною особливістю цього підходу є подання транспортного процесу як послідовності подій у часі, що описують проходження поїздами станцій мережі. Водночас у значній частині досліджень просторові взаємозв'язки між елементами залізничної мережі враховані обмежено [6, 7] або лише опосередковано [8].

У дослідженнях українських учених значну увагу приділено удосконаленню математичних моделей розрахунку плану формування поїздів. Зокрема, у роботі [9] запропоновано уточнення моделі ПФП через урахування впливу завантаженості сортувальних станцій на витрати вагоно-годин. Для пошуку оптимальних варіантів плану формування поїздів використано дані, що мають технологічний і плановий характер, зокрема показники організації вагонопотоків, технологічні параметри роботи станцій, експлуатаційні витрати. Однак у роботі основну увагу зосереджено на оптимізації процесу формування поїздів і витрат вагоно-годин, тоді як задачу інтеграції операційних даних із системою організації вагонопотоків на рівні залізничної мережі безпосередньо не розглянуто. У дослідженні [10] для прогнозування обсягів пасажирських перевезень застосовано агреговані статистичні дані функціонування залізничної транспортної системи. До таких даних належать показники обсягів перевезених пасажирів, фактори, що впливають на формування попиту на перевезення, а також узагальнені характеристики транспортної системи і маршрутів перевезень. На основі цих показників сформовано вхідний набір параметрів прогнозної моделі пасажиропотоку. Використання саме агрегованих статистичних даних допомагає встановити залежності між факторами попиту і обсягами перевезень і застосувати їх для прогнозування пасажирських потоків у системі залізничного транспорту. Однак просторові характеристики пасажиропотоків не враховані. У роботі [1] для аналізу поширення затримок поїздів у залізничній мережі використано модифіковану епідеміологічну SIR-модель, у якій емпіричні дані про затримки агреговані за дільницями мережі з урахуванням пріоритетів поїздів і мережевого ефекту їхньої взаємодії. При цьому питання інтеграції різнорідних операційних даних перевізного процесу, зокрема даних про навантаження вагонів, простій

поїздів і їхню взаємодію з технологічною структурою плану формування поїздів, безпосередньо не розглянуто. Це зумовлює необхідність розроблення методів формування та інтеграції операційних даних залізничної мережі з її графовою структурою, що дає змогу забезпечити більш повний просторово-часовий опис процесів виникнення та поширення затримок поїздів. У дослідженні [11] проаналізовано вплив обсягів перевезень і щільності транспортної роботи на економічну ефективність функціонування залізничної системи України; виконано макрорівневий аналіз даних із виявленням взаємозалежностей і не розглянуто безпосередньо експлуатаційні процеси руху поїздів. У роботі [12] виконано порівняльний аналіз різних схем організації перевезень, що дає змогу оцінити їхній вплив на ефективність використання вагонного парку та час доставлення вантажів.

Останні дослідження дедалі більше уваги приділяють врахуванню просторової структури залізничної системи [13, 14]. У роботі [13] на основі мережево-орієнтованого підходу, де залізниця в кожній часовій мітці розглянута як окремий граф, різні об'єкти, такі як поїзди і станції, є вузлами. У роботі [14] запропонований метод агрегації даних про обсяги перевезень температурно-чутливих вантажів у залізничній логістичній системі за просторовими об'єктами транспортної мережі (містами) і часовими інтервалами спостереження. Отримані агреговані показники використовують як вхідні параметри графової нейронної мережі. Усе більше досліджень спираються на методи інтеграції даних із просторовими структурами організації перевезень.

Отже, аналіз наукових досліджень показує, що важливим етапом побудови, що описують складні процеси утворення заторів, є формування узгоджених масивів вхідних даних, які мають відображати як часові характеристики експлуатаційних процесів, так і просторову структуру транспортної мережі. Разом із тим у більшості існуючих робіт недостатньо уваги приділено інтеграції операційних даних про формування вагонопотоків, навантаження та маршрути їх просування з просторовою структурою організації вагонопотоків у поїзди. Зокрема, можливість використання графової структури плану формування поїздів для формування просторово узгоджених наборів даних для вивчення заторів на залізниці залишаються недостатньо дослідженими.

Визначення мети та завдання дослідження.

Метою роботи є розроблення методу інтеграції операційних даних функціонування залізничної мережі з графовою структурою плану формування поїздів для формування інформаційної основи аналізу та прогнозування затримок поїздопотоків у залізничній системі.

Для досягнення поставленої мети потрібно вирішити такі завдання:

– розробити підхід щодо агрегування та перетворення операційних даних залізничної мережі,

ІНФОРМАЦІЙНО-КЕРУЮЧІ СИСТЕМИ НА ЗАЛІЗНИЧНОМУ ТРАНСПОРТІ

зокрема інформації про обсяги навантаження та випадки простою кинутих поїздів, у показники поїздо-годин затримок, що характеризують порушення технології перевізного процесу;

– сформувати метод інтеграції отриманих експлуатаційних показників із графовою моделлю плану формування поїздів для подальшого аналізу та прогнозування затримок поїздопотоків з урахуванням просторової структури залізничної мережі.

Викладення основного матеріалу. У статті запропоновано метод інтеграції операційних даних залізничної мережі з графовою структурою плану формування поїздів. Цей метод агрегує дані про навантаження, маршрут руху вагонів із розподілом за трьома родами вантажу і видом вагонопотоку, і значення поїздо-годин затриманих поїздів за станціями ПФП для прогнозування затримок.

Для проведення цього дослідження використано операційні дані АТ «Укрзалізниця» про навантаження зернових вантажів, будматеріалів та інших вантажів, крім вантажів гірничо-металургійного комплексу, за період з 1 вересня 2019 року по січень 2020 року, які містять дані з 110567 записів із датою і часом про обсяги навантаження вагонів за станціями відправлення і призначення, кодами вантажів (рис. 1), а також дані з 7682 записів із датою і часом про кількість і тривалість простою кинутих поїздів на станціях полігона мережі регіональної філії «Одеська залізниця» (довідка форми «Детальна довідка про затримку поїздів по станціям дирекції Одеська залізниця більше 12 годин за період звітних дат») (рис. 2).

dataload.xlsx

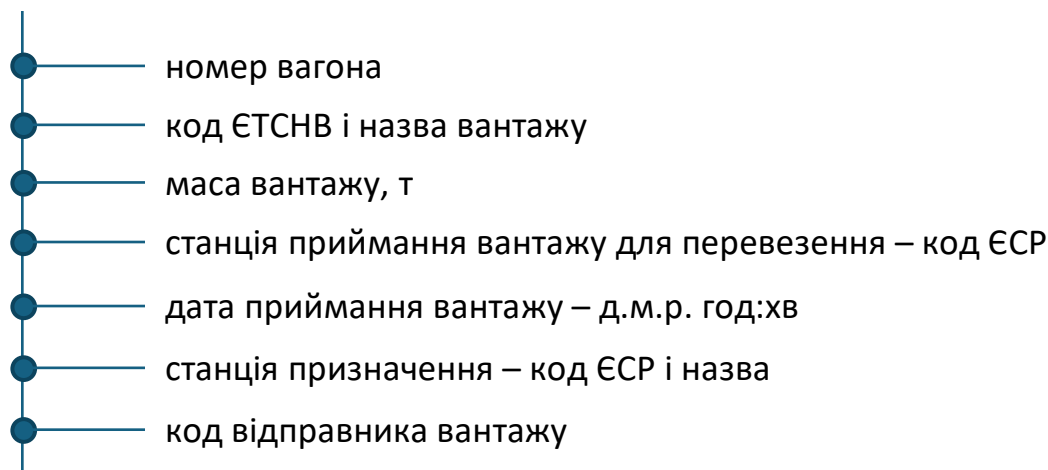


Рис. 1. Структура масиву даних про завантаження вагонів на залізничному полігоні

datadelay.xlsx

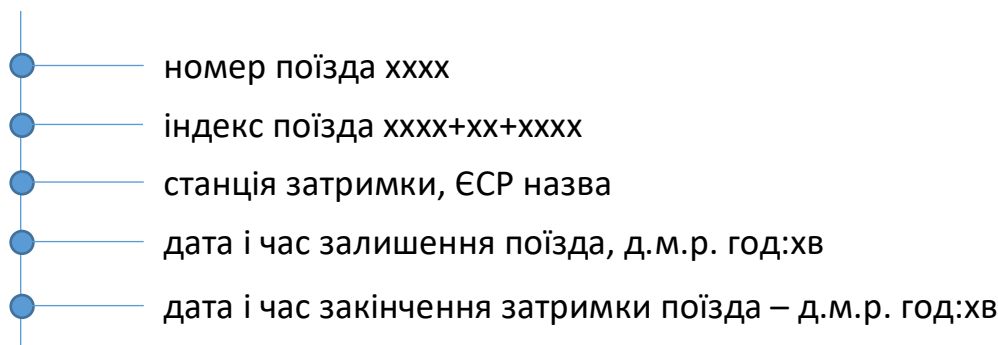


Рис. 2. Структура масиву даних про кинуті поїзди на залізничному полігоні

На першому етапі метод передбачає агрегацію вантажів за кодом ЄТСНВ – Єдина Тарифно-Статистична Номенклатура Вантажів [15]. Кодують вантаж згідно з ЄТСНВ за шестизначним кодом, де перші дві цифри коду позначають порядковий номер

групи, що визначає належність до певної номенклатури вантажів. На цій основі було виокремлено три узагальнені групи вантажів: агропродукція – товари, що належать до класів з кодами 01 та 02 (сільськогосподарська продукція), 50-60 (продукти харчування, напої, товари широкого

ІНФОРМАЦІЙНО-КЕРУЮЧІ СИСТЕМИ НА ЗАЛІЗНИЧНОМУ ТРАНСПОРТІ

вжитку); вантажі, що належать до будівельних матеріалів (будмат) – вантажі з кодами 23 (матеріали мінерально-будівельні природні, зола, шлаки, крім гранульованих металургійних для переплавки), 25 (матеріали стінові покрівельні), 26 (матеріали, вироби будівельні промислового виробництва, крім стінових і покрівельних); інші вантажі – усі решта позицій класифікатора, які не належать до вищезазначених груп. Таке групування ґрунтовано на розподілі загального обсягу перевезеного вантажу за номенклатурою, де домінують будматеріали, а також

зернові та олійні культури. Розроблений алгоритм виконує функцію групування вантажів, яка, аналізуючи перші дві цифри коду ЄТСНВ, відносить запис до узагальнених груп «агро», «будматеріали» або «інші». Виконують агрегувальний SQL-запит із групуванням за номенклатурою вантажу, групою вантажу, станціями відправлення та прибуття і датою, який обчислює сумарну вагу у тоннах і кількість вагонів. Результати переносять у вихідний файл Excel за назвою results.xlsx (рис. 3).

result.xlsx

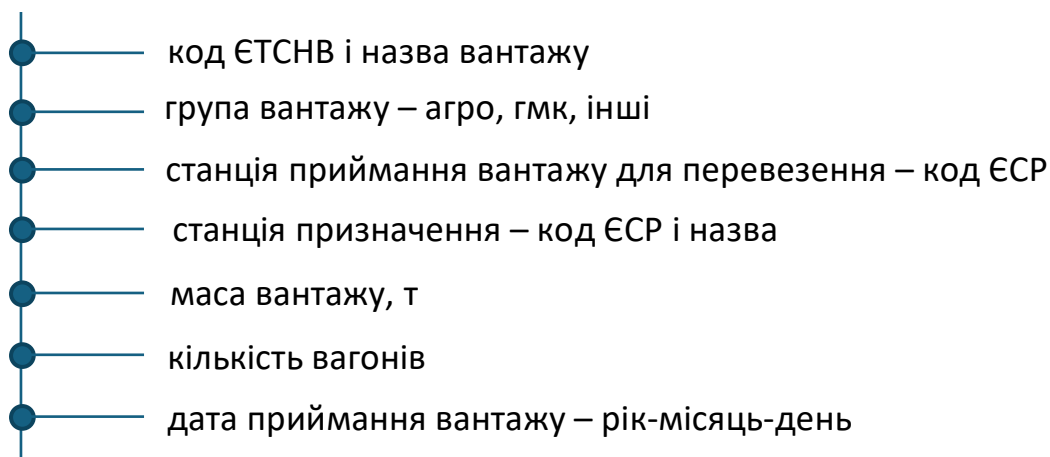


Рис. 3. Структура масиву даних після групування вантажів

Окрім типу вантажу, для опису різної складності технологічного процесу перевезення запропоновано врахувати вид відправлення [16], який визначають за кількістю вагонів, навантажених одночасно на одній станції. Агрегування даних за типом відправлення виконано через поділ навантаження на маршрутні відправки, що ідентифікують за умови одночасного приймання для перевезення з однаковою станцією призначення та отримувачем у понад сорок вагонів, та вагонні відправки, до яких належать групи вагонів із кількістю вагонів до сорока включно. Поділ відправлень на маршрутні та вагонні дає змогу поділити вагонопотоки в ПФП на транзитні з переробкою (тр з/пер) і транзитні без переробки (тр б/пер), що відображає різний рівень складності технологічних операцій на станціях мережі та потенційну ймовірність виникнення затримок.

Запропонований підхід дає змогу зберегти інтерпретацію даних про кількісні та технологічні особливості впливу на перевантаження залізничної мережі і водночас зменшити їхню вимірність для побудови прогнозної моделі.

Для врахування графової структури Плану формування поїздів (ПФП) запропоновано інтегрувати дані про навантаження вагонів і дані про кинуті поїзди з графом ПФП, що описує систему організації вагонопотоків у поїзди на 2018-2019 рік. Оцифрований граф мережі призначень ПФП має для кожної вершини назву станції та унікальний номер станції в мережі (код ЄСР). У межах цього дослідження використано графову структуру ПФП за найменуванням G2019. На рис. 4 наведена концептуальна схема інтеграції даних про навантаження вагонів із графом ПФП.

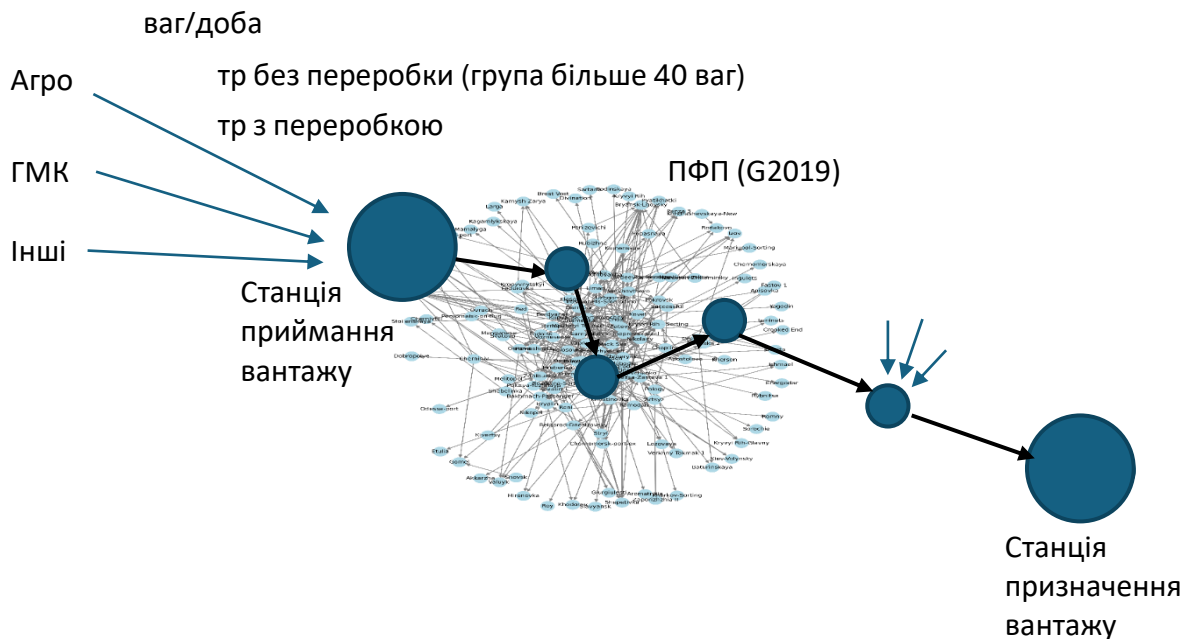


Рис. 4. Концептуальна схема інтеграції даних про навантаження вагонів із графом ПФП

Ураховуючи, що до ПФП входять лише опорні станції залізничної мережі (G2019 має 142 станції), а навантаження може відбуватися на більшій кількості станцій, що не входять у множину опорних, запропоновано, використовуючи вже згруповані дані файлу results.xlsx (рис. 3), здійснити за кожною станцією приймання вантажу для перевезення прив'язку до опорної, що входить до G2019. На рис. 5 наведена задача прив'язки станцій навантаження та призначення вантажу до опорних станцій ПФП. У роботі за допомогою спеціального алгоритму були визначені координати кожної станції відповідно до коду ЄСР. Це дало змогу в межах алгоритму, у випадку якщо станція приймання вантажу для перевезення не відповідала опорній станції ПФП, шукати найближчу станцію ПФП згідно з мінімальною відстанню. Для обчислення відстані між залізничними станціями, що задані їхніми географічними координатами (φ_1, λ_1) і (φ_2, λ_2) , використано формулу гаверсинусів

$$d = R \cdot c = R \cdot 2 \arctan 2(\sqrt{a}, \sqrt{1-a}), \quad (1)$$

$$a = \sin^2\left(\frac{\Delta\varphi}{2}\right) + \cos(\varphi_1)\cos(\varphi_2)\sin^2\left(\frac{\Delta\lambda}{2}\right), \quad (2)$$

$$\Delta\varphi = \varphi_2 - \varphi_1, \quad \Delta\lambda = \lambda_2 - \lambda_1, \quad (3)$$

де φ_1, λ_1 – широта і довгота станції приймання вантажу для перевезення або призначення вантажу, рад;

φ_2, λ_2 – широта і довгота опорної станції ПФП, рад;

R – середній радіус Землі, $R = 6371$ км;

d – геодезична відстань між станціями.

Пошук відстаней за формулою гаверсинусів дає змогу коректно враховувати кривизну Землі, на відміну від евклідової метрики, що має похибки на великих відстанях або різних широтах. Після процедури прив'язки до станцій ПФП за методом алгоритму Дейкстри [17], що використовує функція `nx.shortest_path()` бібліотеки NetworkX [18], шукали маршрут до станції ПФП, що є останньою до станції призначення вантажу.

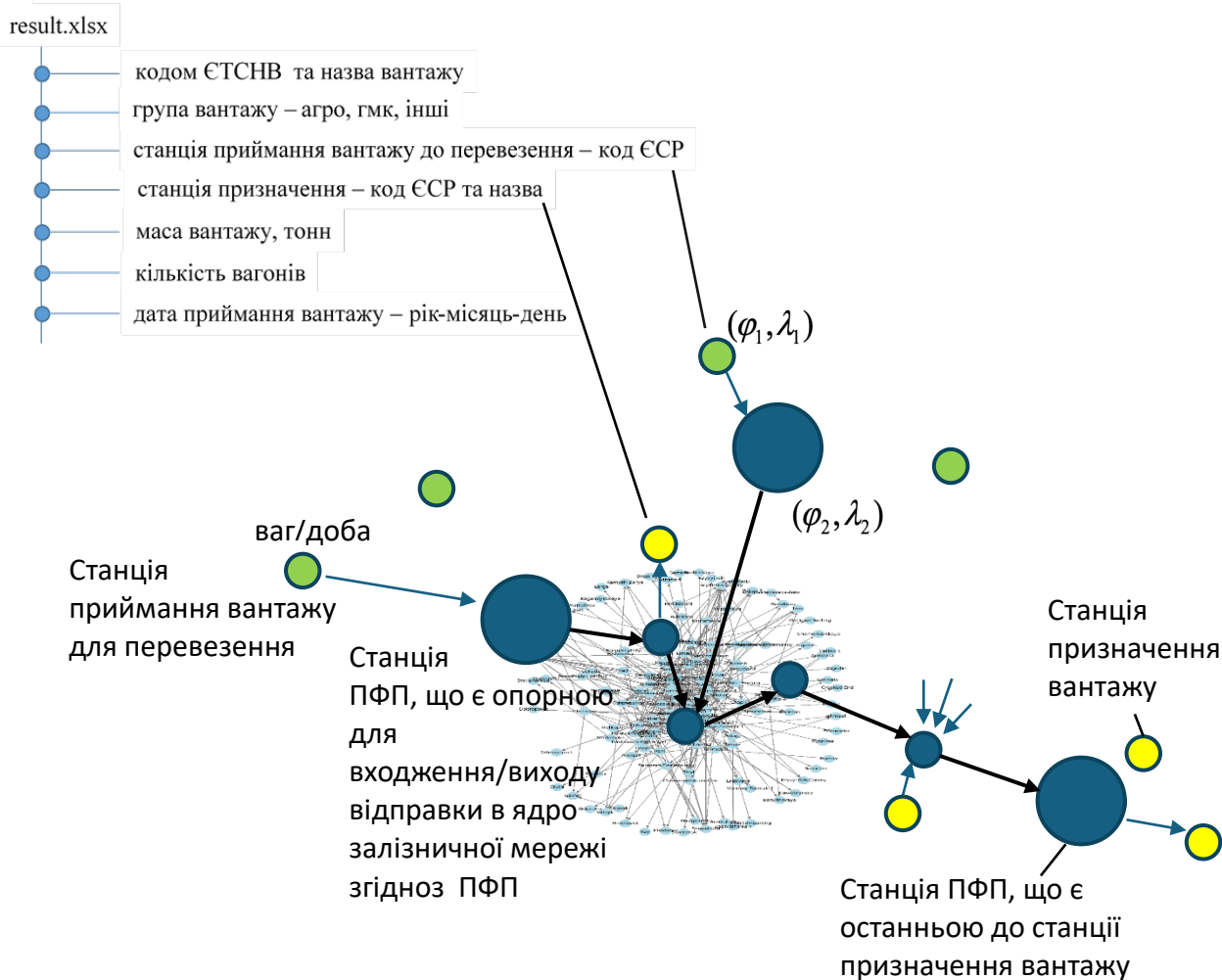


Рис. 5. Схема прив'язки станцій навантаження та призначення вантажу до опорних станцій ПФП

За результатами обчислень згенеровано файл routes.xlsx, у якому до вхідних даних із файлу results.xlsx додано три поля, що враховує послідовність назв станцій згідно зі знайденим маршрутом у графі ПФП, послідовність їхніх кодів і тип поїзда, що визначено порогом за кількістю вагонів (від 40 вагонів і більше – «маршрутна відправка» (М) відповідає типу вагонопотоку «транзит без переробки», інакше (П) – «транзит із переробкою»). На основі масиву даних файлу виконано процедуру постобробки результатів моделювання маршрутів для перетворення знайдених

послідовностей кодів станцій у відповідні номери рядків вихідного реєстру станцій all_codes.txt. У межах процедури сформовано файл routes_full.xlsx, у якому додано поле «Номери рядків», де перетворено послідовність кодів ЄСР станцій у відповідні номери рядків вихідного реєстру станцій файлу all_codes.txt зі збереження характеристик станцій, що вона належить ПФП (якщо станція не належить ПФП, її номер від'ємний). Це необхідно для збереження інформації про тип станції (опорна, що належить ПФП, і допоміжна, що має навантаження) і коректного узгодження маршрутів із подальшими даними та моделями (рис. 6).

routes_full.xlsx

- код ЄТСНВ і назва вантажу
- група вантажу – агро, гмк, інші
- станція приймання вантажу для перевезення – код ЄСР
- станція призначення – код ЄСР і назва
- маса вантажу, т
- кількість вагонів
- дата приймання вантажу – рік-місяць-день
- найкоротший маршрут – послідовність назв станцій
- коди станцій маршрут – послідовність ЄСР станцій
- тип вагонопотоку – М чи П
- номер рядка – послідовність станцій закодованих номером рядка

Рис. 6. Структура масиву даних після процедури постобробки результатів моделювання маршрутів

Файл `routes_full.xlsx` є вихідним для побудови навчальної матриці `load.xlsx` із масивом даних про навантаження розмірності (кількість станцій × кількість днів × вагонопотік), яка агрегує вагонопотік за маршрутом на кожній станції за днями і видами. Кожен день для станції зберігає рівно шість чисел у порядку, де закодовано поля для виду вантажу (агро, гмк, інші) і виду вагонопотоку (тр б/п, тр з/п) (рис. 7). Логіка процедури занесення відправки з відповідною

кількістю вагонів передбачає додавання кількості вагонів у поле станції, яка є початковою та в кожну наступну станцію маршруту, окрім останньої, що є станцією призначення цих вагонів. Послідовність станцій за маршрутом руху відправки вибирають у полі «номер рядка» файлу `routes_full.xlsx`. За таким підходом відображено маршрут руху відправки згідно з ПФП, що дає змогу описати складні взаємозалежності впливу величини вагонопотоку та просторового його руху на затримки в мережі.

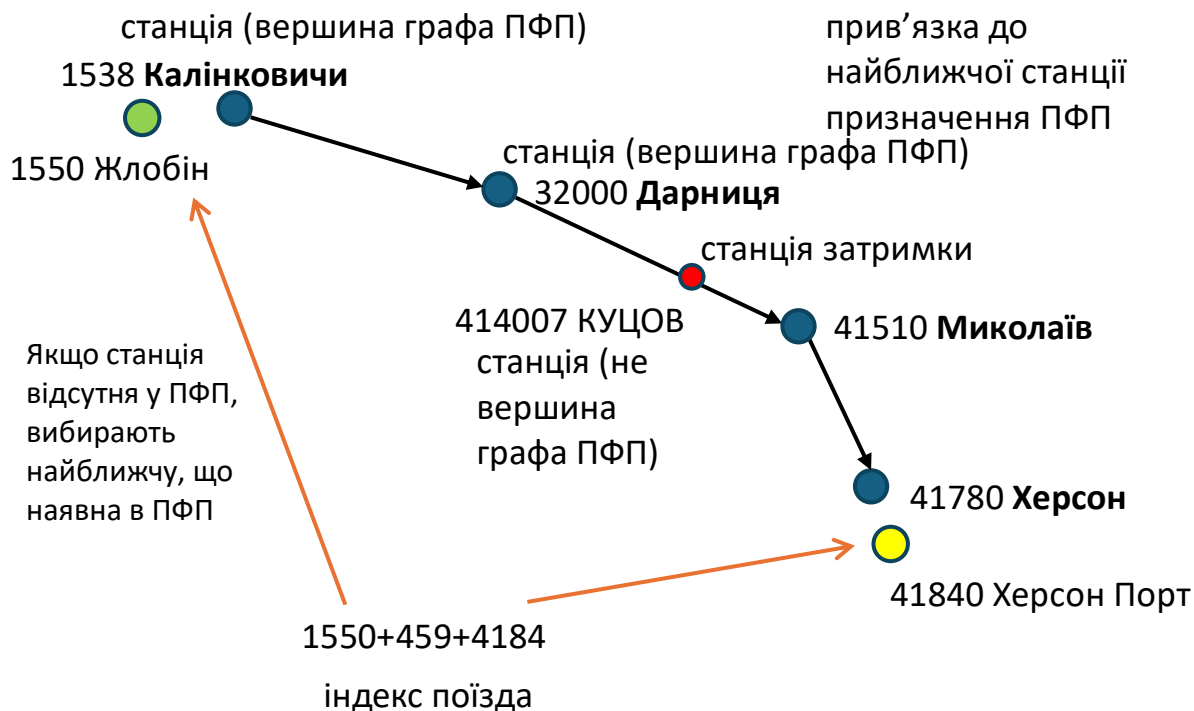
load.xlsx



Рис. 7. Структура масиву даних навчальної вибірки про вагонопотоки та схема кодування виду вагонопотоків для кожної станції ПФП

Для підготовки даних, що описують поїздо-години затриманих поїздів на станціях ПФП, розроблено процедуру на основі даних файлу datadelay.xlsx, де зазначені всі назви станцій затримки відповідних поїздів (рис. 2). Станції затримки часто є проміжними на дільницях, які не входять до опорних станцій ПФП. Важливо зменшити обчислювальний простір поставленої задачі. Із цією метою запропоновано інтегрувати дані станції з ПФП. Для цього ідентифіковано маршрут поїзного формування

за індексом поїзда, після чого в межах знайденої множини вершин запропоновано знаходити праву станцію з останньої пари сусідніх вузлів маршруту (призначення), між якими чисельно лежить код затримки. Наприклад, за рис. 8, станція затримки 41400 лежить у межах сусідньої пари кодів $32000 < 41400 < 41510$, і код станції затримки чисельно лежить між ними, чого достатньо для прив'язки до правого коду 41510.



Маршрут поїзда 15380 → 32000 → 41510 → 41780

Знайдено пару призначення 32000 → 41510

Чисельна перевірка, чи лежить код затримки $32000 < 41400 < 41510$

41510

прив'язка до правої станції призначення ПФП

Рис. 8. Приклад схеми прив'язки станції затримки, що не є станцією ПФП до опорної станції

За умови співпадіння маршруту руху поїзда з існуючим призначенням у ПФП, а код станції затримки не лежить на маршруті і не потрапляє «між парою» вузлів за числовим порядком, застосовують

принцип прив'язки до найближчого за значенням коду пари з пари сусідніх вузлів маршруту. Приклад схеми прив'язки станції затримки за правилом «найближча за кодом» наведено на рис. 9.

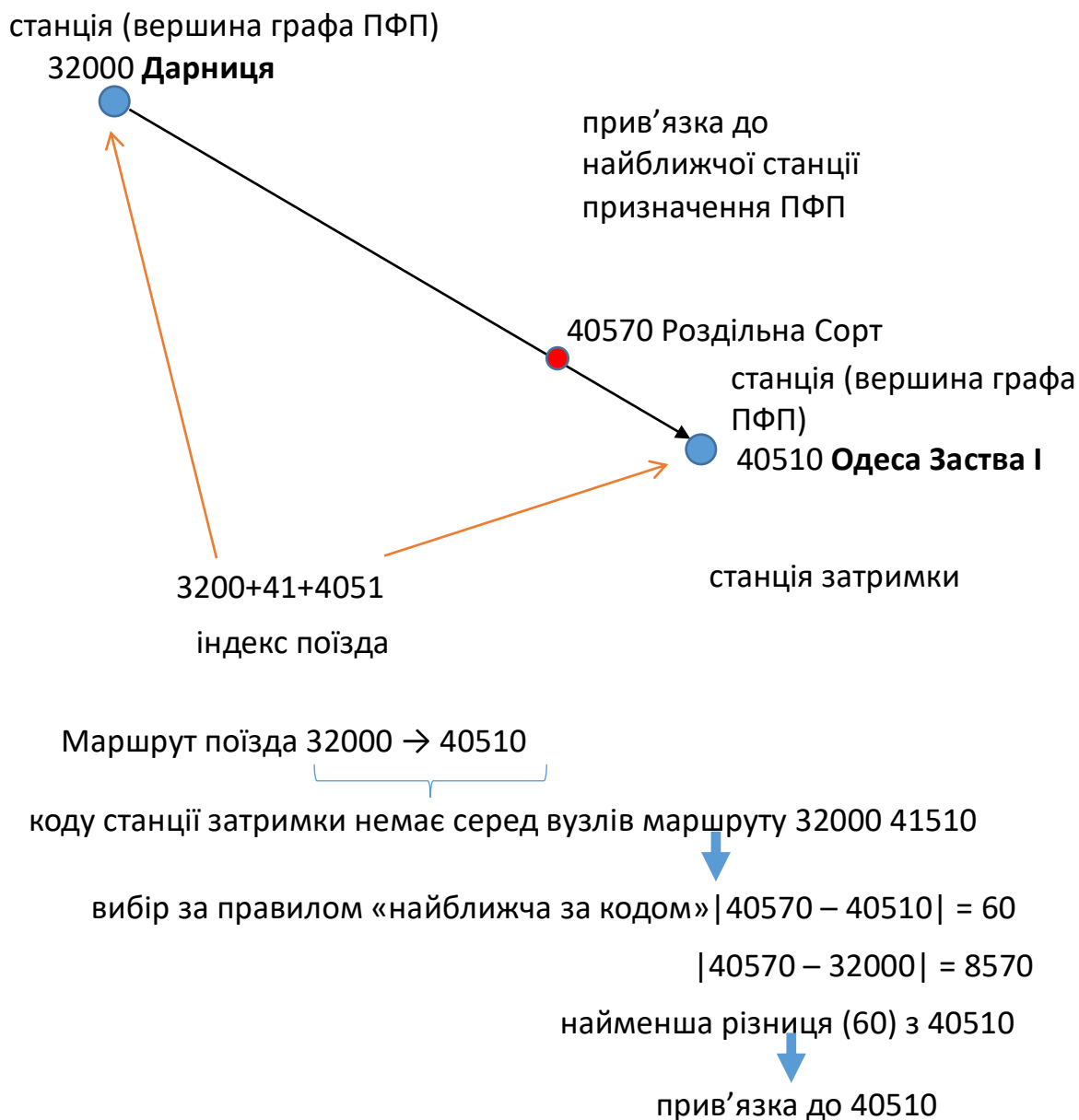


Рис. 9. Приклад схеми прив'язки станції затримки у випадку, якщо код станції затримки не лежить на маршруті і не потрапляє «між парою» вузлів за числовим порядком

За результатами інтеграції загальних даних про затримані поїзди на мережі до множини станцій ПФП згенеровано файл route_report.xlsx, який є вихідним для побудови навчальної матриці для математичної моделі. Відповідно до співставлення рядків вхідної

матриці файлу load.xlsx згенеровано файл outputs.xlsx. У межах процедури перетворено тривалість простоїв у години по кожній даті та сформовано матрицю розмірністю 142 станції ПФП × дати, де в комірках зазначені поїздо-години простою. Структура масиву даних файлу outputs.xlsx наведена на рис. 10.

outputs.xlsx

	A	B	C	D	E
1	Код станції (5 цифр)	Назва станції	31.08.2019	01.09.2019	02.09.2019
2	13020	Брест-Вост.			
3	13940	Лунинец			
4	15000	Гомель			
5	15380	Калинковичи			
6	20000	Брянск-Льговский			
7	32000	Дарница		12,9	28,27694444
8	32050	Киев-Волынский			
9	32500	Чернигов			
10	32600	Бахмач-Пассажирский			

142 станції ПФП

12,9 поїздо-годин затримки

Рис. 10. Структура масиву даних навчальної вибірки про поїздо-години затримки

За результатами реалізації запропонованого підходу сформовано інтегрований набір даних, що поєднує операційні показники навантаження вагонів із графовою структурою плану формування поїздів. Розроблена процедура дала змогу виконати просторову прив'язку станцій навантаження та затримки поїздів до опорних станцій ПФП, а також сформувати маршрути руху вагонопотоків у межах мережі. У результаті було сформовано дві узгоджені матриці даних, зокрема вхідну матрицю load.xlsx, яка містить агреговані параметри навантаження за станціями ПФП, видами вантажів і типами вагонопотоків, і вихідну матрицю outputs.xlsx, що відображає поїздо-години затримок поїздів за станціями мережі.

Отриманий набір даних дає змогу інтегрувати просторову структуру залізничної мережі з операційними показниками перевізного процесу і створює інформаційну основу для побудови математичних моделей аналізу і прогнозування затримок поїздопотоків.

Висновки. У дослідженні розроблено метод інтеграції операційних даних функціонування залізничної мережі з графовою структурою плану формування поїздів, який формує інформаційну основу для аналізу та прогнозування затримок поїздопотоків у залізничній системі. У межах дослідження розроблено підхід щодо агрегування та перетворення операційних даних залізничної мережі, що включають інформацію про обсяги навантаження вагонів і випадки простою кинутих поїздів. Запропонований підхід допоміг узагальнити первинні дані за групами вантажів і видами вагонопотоків і перетворити їх у показники поїздо-годин затримок, які характеризують рівень порушення технології перевізного процесу на станціях мережі.

Сформовано метод інтеграції отриманих експлуатаційних показників із графовою моделлю плану формування поїздів, що дало змогу виконати

просторову прив'язку станцій навантаження та затримок до опорних станцій мережі і врахувати маршрути руху вагонопотоків у структурі ПФП. У результаті сформовано узгоджений набір даних, який поєднує операційні параметри перевізного процесу з просторовою структурою залізничної мережі та може бути використаний як інформаційна основа для подальшого аналізу і побудови математичних моделей прогнозування затримок поїздопотоків.

Список використаних джерел

1. Gurin D., Prokhorchenko A., Kravchenko M. & Shapoval G. Development of a method for modelling delay propagation in railway networks using epidemiological SIR models. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2020. Vol. 6 (3 (108)). P. 6–13. DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2020.219285>
2. Official web-site of JSC Ukrzaliznytsia. URL: https://www.uz.gov.ua/cargo_transportation (accessed: 20.02.2026) [in Ukrainian].
3. Lapamonpinyo P., Derrible S., Corman F. Real-time passenger train delay prediction using machine learning: A case study with Amtrak passenger train routes // *IEEE Open Journal of Intelligent Transportation Systems*. 2022. Vol. 3. P. 539–550. DOI: <https://doi.org/10.1109/OJITS.2022.3194879>
4. Wang P., Zhang Q. Train delay analysis and prediction based on big data fusion. *Transportation Safety and Environment*. 2019. Vol. 1 (1). P. 79-88. DOI: <https://doi.org/10.1093/tse/tdy001>
5. Huang P., Lessan J., Corman F., Meng L. Mining train delay propagation patterns from historical train operation data. Proceedings of the International Conference on Railway Operations Modelling and Analysis (RailNorrköping). *Linköping Electronic Conference Proceedings*.

ІНФОРМАЦІЙНО-КЕРУЮЧІ СИСТЕМИ НА ЗАЛІЗНИЧНОМУ ТРАНСПОРТІ

2019. Vol. 69:29. P. 439-451. URL: <https://ep.liu.se/ecp/069/029/ecp19069029.pdf>
6. Fu Q., Ding S., Zhang T., Wang R., Hu P., Pu C. Short-term train arrival delay prediction: a data-driven approach. *Railway Sciences*. 2024. Vol. 3, No. 4. P. 514–529. DOI: <https://doi.org/10.1108/rs-04-2024-0012>
 7. Zhang D., Peng Y., Zhang Y., Wu D., Wang H., Zhang H. Train Time Delay Prediction for High-Speed Train Dispatching Based on Spatio-Temporal Graph Convolutional Network. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*. 2022. Vol. 23, No. 3. P. 2434–2444. DOI: <https://doi.org/10.1109/TITS.2021.3093840>
 8. Li J., Xu X., Wang J. A Train Delay Prediction Approach for High-Speed Railway Considering Spatiotemporal Logical Relationships in Train Operation. *SSRN Electronic Journal*. 2024. DOI: <https://doi.org/10.2139/ssrn.4828128>
 9. Пархоменко Л. О., Прохоров В. М. Уточнення моделі розрахунку плану формування поїздів за рахунок урахування ефекту навантаженості сортувальних станцій. *Вісник Приазовського державного технічного університету. Серія «Технічні науки»*. 2024. № 48. С. 193–205. DOI: <https://doi.org/10.31498/2225-6733.48.2024.310712>
 10. Butko T., Prymachenko H., Kovalov A., Tarasov K., Kolisnyk A. Research on the Issue of Prognosticationing the Volume of Passenger Traffic on Railway Transport in Modern Conditions. *Review of Economics and Finance*. 2023. Vol. 21. P. 236–245. DOI: <https://doi.org/10.55365/1923.x2023.21.22>
 11. Dmytro D. Economic efficiency of railway in Ukraine: railway economies of scale, scope and density : магістерська робота. Київ : Kyiv School of Economics, 2022. URL: https://kse.ua/wp-content/uploads/2023/07/Dushko-Dmytro_.pdf (дата звернення: 13.03.2026).
 12. Габа В., Стрелько О., Грушевська Т., Гусар І. Дослідження залізничних перевезень вантажів груповими та одиночними вагонами. *Транспортні системи і технології*. 2021. Вип. 36. С. 150–162. DOI: <https://doi.org/10.32703/2617-9040-2020-36-16>
 13. Li Z., Huang P., Wen C., Dong W., Ji Y., Rodrigues F. Railway network delay evolution: A heterogeneous graph neural network approach. *Applied Soft Computing*. 2024. Vol. 159. Article 111640. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.asoc.2024.111640>
 14. Peng T., Gan M., Ou Q., Yang X., Wei L., Ler H. R., Yu H. Railway cold chain freight demand forecasting with graph neural networks: A novel GraphARMA-GRU model. *Expert Systems with Applications*. 2024. Vol. 255, Part B. Article 124693. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2024.124693>
 15. Єдина тарифно-статистична номенклатура вантажів. Офіційний сайт АТ Укрзалізниця. URL: https://uz.gov.ua/cargo_transportation/legal_documents/nomenklatura/changes_etcnb/ (дата звернення 27.01.2026).
 16. Правила приймання вантажів до перевезення: Наказ Міністерства транспорту України. Про затвердження окремих розділів Правил перевезення вантажів : Наказ Міністерства транспорту України від 21 листопада 2000 р. № 644; зареєстр. в Міністерстві юстиції України 24 листопада 2000 р. за № 861/5082. База даних «Законодавство України» / Верховна Рада України. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0861-00#n49> (дата звернення: 28.10.2025).
 17. Dijkstra E. A note on two problems in connexion with graphs. *Numer. Math.* 1959. 1. 269–271.
 18. NetworkX Developers. Shortest Paths – NetworkX Documentation. URL: https://networkx.org/documentation/stable/reference/algorithms/shortest_paths.html (дата звернення: 15.01.2026).

References

1. Gurin, D., Prokhorchenko, A., Kravchenko, M., & Shapoval, G. (2020). Development of a method for modelling delay propagation in railway networks using epidemiological SIR models. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 6(3(108)), 6–13. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2020.219285>
2. JSC Ukrzaliznytsia. (n.d.). *Cargo transportation*. Retrieved February 20, 2026, from https://www.uz.gov.ua/cargo_transportation
3. Lapamonpinyo, P., Derrible, S., & Corman, F. (2022). Real-time passenger train delay prediction using machine learning: A case study with Amtrak passenger train routes. *IEEE Open Journal of Intelligent Transportation Systems*, 3, 539–550. <https://doi.org/10.1109/OJITS.2022.3194879>
4. Wang, P., & Zhang, Q. (2019). Train delay analysis and prediction based on big data fusion. *Transportation Safety and Environment*, 1(1), 79–88. <https://doi.org/10.1093/tse/tdy001>
5. Huang, P., Lessan, J., Corman, F., & Meng, L. (2019). Mining train delay propagation patterns from historical train operation data. *Linköping Electronic Conference Proceedings*, 69(29), 439–451. <https://ep.liu.se/ecp/069/029/ecp19069029.pdf>
6. Fu, Q., Ding, S., Zhang, T., Wang, R., Hu, P., & Pu, C. (2024). Short-term train arrival delay prediction: A data-driven approach. *Railway*

- Sciences*, 3(4), 514–529. <https://doi.org/10.1108/rs-04-2024-0012>
7. Zhang, D., Peng, Y., Zhang, Y., Wu, D., Wang, H., & Zhang, H. (2022). Train time delay prediction for high-speed train dispatching based on spatio-temporal graph convolutional network. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 23(3), 2434–2444. <https://doi.org/10.1109/TITS.2021.3093840>
 8. Li, J., Xu, X., & Wang, J. (2024). A train delay prediction approach for high-speed railway considering spatiotemporal logical relationships in train operation. *SSRN Electronic Journal*. <https://doi.org/10.2139/ssrn.4828128>
 9. Parkhomenko, L. O., & Prokhorov, V. M. (2024). Utochnennia modeli rozrakhunku planu formuvannia poizdiv za rakhunok urakhuvannia efektu navantazhenosti sortovalnykh stantsii [Refinement of the model for calculating the train formation plan by taking into account the effect of marshalling yards loading]. *Visnyk Pryazovskoho derzhavnoho tekhnichnoho universytetu. Seriya «Tekhnichni nauky»* [Reporter of the Priazovskiy State Technical University. Section: Technical Sciences], (48), 193–205. <https://doi.org/10.31498/2225-6733.48.2024.310712>
 10. Butko, T., Prymachenko, H., Kovalov, A., Tarasov, K., & Kolisnyk, A. (2023). Research on the issue of prognostication of the volume of passenger traffic on railway transport in modern conditions. *Review of Economics and Finance*, 21, 236–245. <https://doi.org/10.55365/1923.x2023.21.22>
 11. Dushko, D. (2022). *Economic efficiency of railway in Ukraine: Railway economies of scale, scope and density* [Master's thesis, Kyiv School of Economics]. https://kse.ua/wp-content/uploads/2023/07/Dushko-Dmytro_.pdf
 12. Haba, V., Strelko, O., Hrushevska, T., & Husar, I. (2021). Doslidzhennia zaliznychnykh perevezen vantazhiv hrupovymy ta odynochnymy vahonamy [Study of railway freight transport by group and single wagons]. *Transportni systemy i tekhnolohii* [Transport Systems and Technologies], (36), 150–162. <https://doi.org/10.32703/2617-9040-2020-36-16>
 13. Li, Z., Huang, P., Wen, C., Dong, W., Ji, Y., & Rodrigues, F. (2024). Railway network delay evolution: A heterogeneous graph neural network approach. *Applied Soft Computing*, 159, Article 111640. <https://doi.org/10.1016/j.asoc.2024.111640>
 14. Peng, T., Gan, M., Ou, Q., Yang, X., Wei, L., Ler, H. R., & Yu, H. (2024). Railway cold chain freight demand forecasting with graph neural networks: A novel GraphARMA-GRU model. *Expert Systems with Applications*, 255(Part B), Article 124693. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2024.124693>
 15. JSC Ukrzaliznytsia. (n.d.). *Iedyna taryfno-statystychna nomenklatura vantazhiv* [Unified tariff and statistical nomenclature of goods]. Retrieved January 27, 2026, from https://uz.gov.ua/cargo_transportation/legal_documents/nomenklatura/changes_etcnb/
 16. Verkhovna Rada of Ukraine. (2000). *Pravylyn pryimannia vantazhiv do perevezennia: Nakaz Ministerstva transportu Ukrainy No. 644* [Rules for accepting goods for transportation: Order of the Ministry of Transport of Ukraine No. 644]. Baza danykh «Zakonodavstvo Ukrainy». Retrieved October 28, 2025, from <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0861-00#n49>
 17. Dijkstra, E. W. (1959). A note on two problems in connexion with graphs. *Numerische Mathematik*, 1, 269–271.
 18. NetworkX Developers. (n.d.). *Shortest paths*. NetworkX Documentation. Retrieved January 15, 2026, from https://networkx.org/documentation/stable/reference/algorithms/shortest_paths.html

KYMAN A. M., PROKHORCHENKO H. O., Kravchenko M. A.

Development of a method for integrating railway operational data with the graph structure of the train formation plan

Abstract. *The paper proposes a method for integrating operational railway network data with the graph structure of the train formation plan. The method is aimed at creating an information basis for the analysis and forecasting of train flow delays while taking into account the spatial structure of the railway transport system. The study uses operational data of JSC «Ukrzaliznytsia» related to wagon loading of different freight categories as well as information on idle «abandoned» trains at stations within the operational area of the Odesa Railway regional branch. A data preprocessing procedure is developed that aggregates operational records according to freight groups and wagon flow types. The obtained data are further transformed into indicators of train-hours of delay, which characterize disruptions in the technological process of railway transportation. To incorporate the spatial structure of the railway network, a method is proposed for integrating loading data and delay information with the graph representation of the train formation plan. The proposed approach includes an algorithm for assigning loading stations and delay stations to the main stations of the train formation network using geographical coordinates and graph-based routing procedures. This makes it possible to reconstruct wagon flow routes within the network and to represent the interaction between freight flows and railway infrastructure nodes. As a result, an integrated dataset was generated that combines operational indicators of wagon loading, spatial routes of freight flows, and delay indicators expressed in train-*

hours. The resulting data structure forms a consistent input and output dataset that can be used as a training sample for the development of mathematical models for the analysis and prediction of train delays in railway networks. The proposed method enables the integration of operational transportation data with the spatial topology of the railway network and can serve as a basis for further research on delay propagation and predictive modeling of railway transport processes.

Keywords: railway network, train formation plan, graph model, operational transportation data, wagon flows, train delays, delay prediction.

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

Киман Андрій Миколайович, кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри управління вантажною і комерційною роботою, Український державний університет залізничного транспорту.

ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-4000-3287>.

E-mail: kyman.am@kart.edu.ua.

Прохорченко Галина Олегівна, кандидат технічних наук, доцент кафедри управління експлуатаційною роботою, Український державний університет залізничного транспорту.

ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0003-1158-3953>.

E-mail: g.o.prokhorchenko@kart.edu.ua.

Кравченко Михайло Анатолійович, кандидат технічних наук, докторант кафедри управління експлуатаційною роботою, Український державний університет залізничного транспорту.

ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0001-7445-8952>.

E-mail: kravchenko.ma@kart.edu.ua.

Kyman Andrii, PhD (Tech), Associate Professor, Associate Professor of the Department of Freight and Commercial Operations Management, Ukrainian State University of Railway Transport.

ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-4000-3287>.

E-mail: kyman.am@kart.edu.ua.

Prokhorchenko Halyna, PhD (Tech), Associate Professor of the Department of Operations Management, Ukrainian State University of Railway Transport.

ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0003-1158-3953>.

E-mail: g.o.prokhorchenko@kart.edu.ua.

Kravchenko Mykhailo, PhD (Tech), doctoral student of the Department of Operations Management, Ukrainian State University of Railway Transport.

ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0001-7445-8952>.

E-mail: kravchenko.ma@kart.edu.ua.

Стаття надійшла 02.03.26

Стаття прийнята до друку після рецензування 10.04.26

Стаття опублікована (оприлюднена) 29.05.26

PANCHENKO SERHII VOLODYMYROVYCH¹, Doctor of Technical Sciences, Professor
 LYSECHKO VOLODYMYR PETROVYCH², Doctor of Technical Sciences, Professor
 ZHUCHENKO OLEKSANDR SERHII OVYCH¹, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor

INDYK SERHII VOLODYMYROVYCH¹, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor
 1 Ukrainian State University of Railway Transport, Kharkiv, Ukraine
 2 Ivan Kozhedub Kharkiv National Air Force University, Kharkiv, Ukraine

Efficiency evaluation of a code division multiple access system based on a multilevel functional model of performance indicators

Efficiency Evaluation of a Code Division Multiple Access System Based on a Multilevel Functional Model of Performance Indicators

The article considers the problem of evaluating the efficiency of a code division multiple access system that uses ensembles of unequal-energy complex signals. The purpose of the work is to develop an efficiency evaluation procedure for a code division multiple access system based on a multilevel functional model of performance indicators with determination of the set of model levels sufficient for the stated task. The multilevel functional model is treated as a set of levels ordered by the degree of generalization of efficiency estimates. Each level is associated with functionals that determine the corresponding performance indicators. The model includes energy, structural, power-channel and system levels. The energy level is related to the energy composition of the signal ensemble, the structural level is related to mutual-correlation parameters of the signals, the power-channel level is related to the corresponding channel-level parameter, and the system level is related to the final estimate for the stated task. The full model keeps a sequential structure: the indicator of each upper level is determined through the indicator of the previous adjacent level and the parameters that enter the current level. This prevents the system-level indicator from being mixed with the reduced functional used for comparison of variants. The procedure uses functional reduction to determine which level functionals must take part in the reduced functional for a given finite set of compared variants. For each level under consideration, the procedure checks whether there is at least one pair of variants for which the value of the corresponding level functional differs. If all variants have the same value of a level functional, that level does not enter the reduced functional for the considered task. If at least one level satisfies the difference condition, the reduced functional is formed by the mapping that transforms the values of the sufficient level functionals into one numerical efficiency estimate for each variant. The obtained numerical estimates are then used to order the variants according to the selected type of task, minimization or maximization. The practical value of the result is that efficiency evaluation, synthesis or optimization of a code division multiple access system can be performed by the values of the reduced functional, while the full multilevel model remains sequential and the comparison uses only the set of levels that is sufficient for the stated task and the given set of variants.

Keywords: code division multiple access system; complex signal; performance indicator; multilevel functional model; functional reduction; reduced functional; energy level; structural level; power-channel level; system level.

Introduction.

Ultra-wideband transmission modes with impulse signals form a technical basis for energy-efficient wireless access devices with practically implemented high-frequency transmitting, receiving and processing paths in the 3.1–10.6 GHz and 57–71 GHz bands. The possibility of using impulse signals in such modes is defined by the IEEE 802.15.4 family of standards [1, 2]. For code division multiple access based on complex impulse signals, the key property of a signal ensemble is the ability to keep a low level of multiple-access interference for arbitrary time shifts between signals. In [3], ensembles of periodic impulse sequences were proposed that meet these requirements. However, the signals in such ensembles have different numbers of impulses and are therefore unequal in energy.

To evaluate unequal-energy ensembles, equivalent transformations were used in [4, 5]. These transformations connect the original ensemble with conditional equal-energy ensembles that are equivalent in total signal energy. This makes it possible to apply analytical relations developed for equal-energy ensembles of complex signals to unequal-energy ensembles and to use these relations in analysis, comparison and ranking tasks.

The obtained analytical relations make it possible to select, compare and rank ensembles by partial indicators. Efficiency evaluation of a code division multiple access system requires a transition from partial indicators to a generalized efficiency estimate of the system as a whole. For this purpose, a mathematical model is needed.

©PANCHENKO S. V., LYSECHKO V. P., ZHUCHENKO O. S., INDYK S. V., 2026

This model must define the set of indicators, their distribution by levels of consideration, the relations between indicators and the rule for obtaining the final estimate.

The analysis of publications [6–19] showed that mathematical models used to obtain the corresponding estimates or indicators are defined by the task, input data, application conditions and required result, and have common features: decomposition of a system or a task into elements, subsystems and relations between elements and subsystems; definition of functions of elements and subsystems; definition of inputs, outputs and states of elements or subsystems; definition of levels of a hierarchical structure, subtasks or functions; aggregation of partial results to obtain a system estimate; aggregation of elements and subsystems into the system as a whole; simplification of the task through decomposition, model reduction, reduction of task dimensionality, use of simpler models and replacement of level functions by their approximations. An approach to evaluating performance indicators of a code division multiple access system based on a multilevel functional model and using the theoretical apparatus of system and functional analysis [20–22] was considered in [23, 24]. The use of a multilevel functional model requires determination of the set of levels needed for the stated task of efficiency evaluation, synthesis or optimization. This leads to the need to determine the model levels whose functionals give different values for the compared variants and must take part in forming the estimate.

The purpose of the article is to develop an efficiency evaluation procedure for a code division multiple access system based on a multilevel functional model of performance indicators with determination of the set of model levels sufficient for solving the stated task.

Discussion of the problem.

A multilevel functional model of performance indicators of a code division multiple access system is defined as a set of levels ordered by the degree of generalization of efficiency estimates. Each level is assigned functionals that determine the corresponding performance indicators. The considered multilevel functional model includes the energy, structural, power-channel and system levels. The functional relations of the multilevel model are determined by the following relations:

$$P_{EN} = F_{EN}((E_1, E_2, \dots, E_L), L),$$

$$P_{STR} = F_{STR}(P_{EN}, L, R_{max}^2),$$

$$P_{CHP} = F_{CHP}(P_{STR}, N),$$

$$P_{SYS} = F_{SYS}(P_{CHP}, C_{SYS}),$$

where P_{EN} , P_{STR} , P_{CHP} , P_{SYS} – performance indicators of the energy, structural, power-channel and system levels, respectively;

F_{EN} , F_{STR} , F_{CHP} , F_{SYS} – functionals of the energy, structural, power-channel and system levels, respectively;

L – ensemble size;

E_i – energy of the i -th signal of the ensemble,

$$i = 1, 2, \dots, L;$$

R_{max}^2 – maximum value, over the ensemble, of the squared cross-correlation;

N – parameter of the power-channel level determined by the communication channel model;

C_{SYS} – vector of parameters that directly enter the system level.

The energy level reflects the energy composition of the signal ensemble. The structural level reflects the correlation properties of the ensemble. The power-channel level takes into account the influence of the communication channel model. The system level gives the final estimate according to the stated task.

In practical use of the model, not every level necessarily affects the result of comparison of the variants. If the values of the functional of a certain level are the same for all compared variants, then this level does not affect their ordering. In this case, it is sufficient to use only those levels whose functionals give different values for at least one pair of variants.

Functional reduction of the set of model levels will mean the rule for forming a reduced functional by those levels whose functionals give different values for the compared variants. This rule does not change the sequential structure of the full four-level model. It only determines the set of levels whose functionals take part in the reduced numerical estimate for the stated task.

A functional formed by this rule will be called the reduced functional. The value of this functional is used as one numerical estimate for comparing and ranking the variants.

To determine the reduced functional, we introduce the mapping Φ_{red} , which transforms the values of the functionals of sufficient levels into one numerical efficiency estimate for comparing the variants. The reduced functional defines the comparison rule for the variants and does not change the sequential relations of the full four-level model.

Consider a finite set of variants of system construction, signal ensemble construction or parameter selection:

$$S = \{x^{(1)}, x^{(2)}, \dots, x^{(K)}\},$$

where S – set of compared variants;

$x^{(k)}$ – k -th variant, $k = 1, \dots, K$;

K – number of variants.

For the implementation of functional reduction, we specify the composition of each variant by levels:

$$x^{(k)} = (x_{EN}^{(k)}, x_{STR}^{(k)}, x_{CHP}^{(k)}),$$

$k = 1, \dots, K$,

where

$x_{EN}^{(k)}$ – set of parameters of the energy level for

the k -th variant;

$x_{STR}^{(k)}$ – set of parameters of the structural level

for the k -th variant;

$x_{CHP}^{(k)}$ – set of parameters of the power-channel

level for the k -th variant.

We introduce the functionals of the energy level F_{EN} , structural level F_{STR} and power-channel level F_{CHP} . The functional of the system level F_{SYS} determines the system-level indicator through the power-channel level indicator and the parameter vector of the system level.

For the levels whose functionals may enter the reduced functional, we introduce the set:

$$W = \{EN, STR, CHP\}.$$

The set of levels whose functionals enter the reduced functional is denoted by W_{red} . The set W_{red} includes the levels from W for which the value of the corresponding level functional differs for at least one pair of variants from the set S .

For an arbitrary level w from the set W , the corresponding level functional is denoted by F_w . The value $F_w(x)$ is the result of calculating the functional of level w for variant x . For a variant x , the value of the reduced functional is determined through the mapping Φ_{red} , whose argument is the set $(F_w(x))_{w \in W_{red}}$:

$$F_{red}(x) = \Phi_{red} \left((F_w(x))_{w \in W_{red}} \right),$$

where F_{red} – reduced functional;

$F_{red}(x)$ – value of the reduced functional for variant x ;

Φ_{red} – mapping whose argument is the set $(F_w(x))_{w \in W_{red}}$ and whose value is $F_{red}(x)$;

$F_w(x)$ – value of the functional of level w for variant x ;

W_{red} – set of levels whose functionals enter the reduced functional.

For each variant $x^{(k)}, k = 1, \dots, K$, we calculate the set of values $(F_w(x^{(k)}))_{w \in W_{red}}$.

Then, using the selected mapping Φ_{red} , we determine the value of the reduced functional $F_{red}(x^{(k)})$.

The algorithm of functional reduction of the set of levels of the multilevel functional model for a finite set of variants S includes the following steps.

Step 1. Define the initial data:

1) specify the set of compared variants:

$$S = \{x^{(1)}, x^{(2)}, \dots, x^{(K)}\},$$

where

S – set of compared variants;

$x^{(k)}$ – k -th variant;

K – number of variants.

2) specify the set of functionals of the levels that may enter the reduced functional: $\{F_{EN}, F_{STR}, F_{CHP}\}$;

3) specify the system-level indicator through the power-channel level indicator and the parameter vector of the system level:

$$P_{SYS} = F_{SYS}(P_{CHP}, C_{SYS}),$$

where

F_{SYS} – functional of the system level;

P_{CHP} – performance indicator of the power-channel level;

C_{SYS} – vector of parameters that directly enter the system level.

4) specify the set of levels whose functionals may enter the reduced functional:

$$W = \{EN, STR, CHP\},$$

ІНФОРМАЦІЙНО-КЕРУЮЧІ СИСТЕМИ НА ЗАЛІЗНИЧНОМУ ТРАНСПОРТІ

where W - set of levels whose functionals may enter the reduced functional;

EN, STR, CHP - energy, structural and power-channel levels, respectively.

Step 2. For each level w from the set W , check whether the value of the corresponding functional can differ for at least one pair of compared variants:

1) for each $w \in W$, define the condition R_w :

$$R_w: \exists A, B \in \{1, \dots, K\}, A \neq B: F_w(x^{(A)}) \neq F_w(x^{(B)}),$$

where R_w - condition that determines the presence of a difference between values of the functional of level w ;

A, B - numbers of compared variants;

$F_w(x^{(A)}), F_w(x^{(B)})$ - values of the functional of level w for variants $x^{(A)}$ and $x^{(B)}$.

2) determine the set of levels W_{red} whose functionals enter F_{red} as the set of levels w from W for which the condition R_w is satisfied:

$$W_{red} = \{w \in W: R_w\};$$

3) complete the algorithm without defining F_{red} if the set W_{red} is empty:
 $W_{red} = \emptyset.$

Step 3. Define the reduced functional F_{red} through the mapping Φ_{red} for the case $W_{red} \neq \emptyset$:

$$F_{red}(x) = \Phi_{red} \left((F_w(x))_{w \in W_{red}} \right).$$

Step 4. For each variant number $k = 1, \dots, K$, calculate the set of values $(F_w(x^{(k)}))_{w \in W_{red}}$ and use the mapping Φ_{red} to

determine the value $F_{red}(x^{(k)})$:

$$F_{red}(x^{(k)}) = \Phi_{red} \left((F_w(x^{(k)}))_{w \in W_{red}} \right).$$

Step 5. Order the variants by the values $F_{red}(x^{(k)}), k = 1, \dots, K$:

1) specify the task type:

$opt \in \{min, max\}$, where opt - task type: minimization or maximization of the values $F_{red}(x^{(k)}), k = 1, \dots, K$.

2) build a permutation of variant numbers $\sigma: \{1, \dots, K\} \rightarrow \{1, \dots, K\}$ such that, for minimization, the following ordering holds:

$$F_{red}(x^{(\sigma(1))}) \leq F_{red}(x^{(\sigma(2))}) \leq \dots \leq F_{red}(x^{(\sigma(K))}),$$

and, for maximization, the following ordering holds:

$$F_{red}(x^{(\sigma(1))}) \geq F_{red}(x^{(\sigma(2))}) \geq \dots \geq F_{red}(x^{(\sigma(K))}),$$

where σ - permutation of variant numbers;

j - position number in the ordered sequence,
 $j = 1, \dots, K$;

$\sigma(j)$ - number of the variant that occupies the j -th position in the ordered sequence;

$x^{(\sigma(j))}$ - variant that occupies the j -th position in the ordered sequence by the values $F_{red}(x^{(k)}), k = 1, \dots, K$.

3) take the ordered sequence of variants as the result of evaluation:

$$x^{(\sigma(1))}, x^{(\sigma(2))}, \dots, x^{(\sigma(K))}.$$

The resulting algorithm determines the levels whose functionals take part in the reduced functional, forms one numerical estimate $F_{red}(x^{(k)})$ for each variant and orders the variants according to the selected task type. If, for a certain level, the corresponding functional has the same value for all variants from S, this level does not affect the ordering and is not included in W_{red} . Thus, the procedure keeps the sequential structure of the full multilevel model and uses only the levels that are sufficient for comparing the variants in the stated task.

Conclusions.

A multilevel functional model of performance indicators for a code division multiple access system has been considered with the separation of energy, structural, power-channel and system levels. The full model keeps a sequential structure in which the system-level indicator is obtained through the power-channel level indicator and the parameter vector that enters the system level. Functional reduction has been defined as a rule for forming a reduced functional by the levels for which, on a given set of compared variants, at least one pair of

ІНФОРМАЦІЙНО–КЕРУЮЧІ СИСТЕМИ НА ЗАЛІЗНИЧНОМУ ТРАНСПОРТІ

variants has different values of the corresponding level functional. The proposed efficiency evaluation procedure determines the set of model levels sufficient for the stated task, forms the reduced functional using this set and orders the variants by the values of the reduced functional according to the selected task type. The practical value of the results is that the multilevel functional model together with the functional reduction procedure makes it possible to compare variants of code division multiple access systems using the set of model levels sufficient for the stated task, without replacing the sequential structure of the full model.

REFERENCES

1. IEEE Standard for Information technology--Local and metropolitan area networks--Specific requirements--Part 15.4: Wireless Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications for Low-Rate Wireless Personal Area Networks (WPANs): Amendment 1: Add Alternate PHYs. IEEE 802.15.4a-2007. <https://standards.ieee.org/ieee/802.15.4a/3571/>.
2. IEEE Standard for Low-Rate Wireless Networks--Amendment 1: Enhanced Ultra Wideband (UWB) Physical Layers (PHYs) and Associated Ranging Techniques. IEEE 802.15.4z-2020. <https://standards.ieee.org/ieee/802.15.4z/10230/>
3. Indyk S. V., Lysechko V. P., Zhuchenko O. S., Kitov V. S. The Formation Method of Complex Signals Ensembles by Frequency Filtration of Pseudo-Random Sequences with Low Interaction in the Time Domain. *Radio Electronics, Computer Science, Control*. 2020. No. 4. P. 7–14. <https://doi.org/10.15588/1607-3274-2020-4-1>.
4. Жученко О. С., Індик С. В. Методологія оцінювання ефективності ансамблів різноенергетичних складних сигналів у надширокопasmових системах множинного доступу з кодовим розділенням. Застосування інформаційних технологій у підготовці та діяльності сил безпеки і оборони : збірник тез доповідей Міжнародної науково-практичної конференції, 17 березня 2026 р., м. Харків. Харків : Нац. акад. НГУ, 2026. С. 368–370.
5. Zhuchenko O., Panchenko S., Lysechko V., Indyk S. Methodology of Equivalent Transformations of Unequal-Energy Complex Signal Ensembles in Code-Division Multiple Access Systems. *Комп'ютерно-інтегровані технології: освіта, наука, виробництво*. 2026. Вип. 62. С. 337–345. <https://doi.org/10.36910/6775-2524-0560-2026-62-38>.
6. Gorbachov V., Sytnikov D., Ryabov O., Batiaa A. K., Ponomarenko O. Dimension Reduction for Network Systems Using Structure Model Aggregation. *International Journal of Design & Nature and Ecodynamics*. 2020. Vol. 15, No. 1. P. 13–23. <https://doi.org/10.18280/ij dne.150103>.
7. Пономаренко О. Є., Горбачов В. О. Агрегація структурної моделі складних мережних систем. Системи управління, навігації та зв'язку. *Збірник наукових праць*. 2023. Т. 1. № 71. С. 138–144. <https://doi.org/10.26906/SUNZ.2023.1.138>.
8. Пономаренко О. Є., Горбачов В. О. Програмна платформа для оцінювання ефективності агрегації структурної моделі складних систем. *Сучасний стан наукових досліджень та технологій в промисловості*. 2023. № 3 (25). С. 79–87. <https://doi.org/10.30837/ITSSI.2023.25.079>.
9. Поліщук О. Д. Редукція складності моделей мережних структур та систем. *Доповіді Національної академії наук України*. 2019. № 6. С. 12–19. <https://doi.org/10.15407/dopovidi2019.06.012>.
10. Berges J. M., Spütz K., Jacobs G., Kowalski J., Zerwas T., Berroth J., Konrad C. Automated Identification of Valid Model Networks Using Model-Based Systems Engineering. *Systems*. 2022. Vol. 10, No. 6. Article 250. <https://doi.org/10.3390/systems10060250>.
11. Zhang Y., Roeder J., Jacobs G., Berroth J., Hoepfner G. Virtual Testing Workflows Based on the Function-Oriented System Architecture in SysML: A Case Study in Wind Turbine Systems. *Wind*. 2022. Vol. 2, No. 3. P. 599–616. <https://doi.org/10.3390/wind2030032>.
12. Hoepfner G., Kowalski J., Faustmann C., Zerwas T., Kranabittl P., Vafaei S., Jacobs G., Hick H. A Classification Method for the Systematic Identification of Models and Workflows in MBSE. *DS 119: Proceedings of the 33rd Symposium Design for X (DFX2022)*. 2022. 10 p. <https://doi.org/10.35199/dfx2022.17>.
13. Irnich L., Jacobs G., Zerwas T., Konrad C. Combining and evaluating function-oriented solutions in model-based systems engineering. *Forschung im Ingenieurwesen*. 2023. Vol. 87. P. 375–386. <https://doi.org/10.1007/s10010-023-00619-0>.
14. Horta J., Siller M., Villarreal-Reyes S. Cross-layer latency analysis for 5G NR in V2X communications. *PLOS ONE*. 2025. Vol. 20, No. 1. e0313772. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0313772>.
15. Rehman A., Valentini R., Cinque E., Di Marco P., Santucci F. On the Impact of Multiple Access Interference in LTE-V2X and NR-V2X Sidelink Communications. *Sensors*. 2023. Vol. 23, No. 10. Article 4901. <https://doi.org/10.3390/s23104901>.
16. Гальченко В. Я., Трембовецька Р. В., Тичков В. В., Сторчак А. В. Методи створення метамоделей: стан питання. *Вісник Вінницького політехнічного інституту*. 2020. № 4. С. 74–88. <https://doi.org/10.31649/1997-9266-2020-151-4-74-88>.
17. Mezzavilla M., Miozzo M., Rossi M., Baldo N., Zorzi M. A Lightweight and Accurate Link Abstraction Model for the Simulation of LTE Networks in ns-3. *MSWiM 2012 : Proceedings of the 15th ACM International Conference on Modeling, Analysis and Simulation of Wireless and Mobile Systems*. 2012. P. 55–60. <https://doi.org/10.1145/2387238.2387250>.
18. Wang J., Varshney N., Zhang J., Griffith D., Golmie N. Deep Learning Based Link-Level Abstraction for mmWave Communications. *2021 IEEE SmartWorld, Ubiquitous Intelligence & Computing, Advanced & Trusted Computing, Scalable Computing &*

ІНФОРМАЦІЙНО–КЕРУЮЧІ СИСТЕМИ НА ЗАЛІЗНИЧНОМУ ТРАНСПОРТІ

Communications, Internet of People and Smart City Innovation. 2021. P. 391–398.

<https://doi.org/10.1109/SWC50871.2021.00060>.

19. Wu Z., Bartoletti S., Martinez V., Bazzi A. A Methodology for Abstracting the Physical Layer of Direct V2X Communications Technologies. *Sensors*. 2022. Vol. 22, No. 23. Article 9330. <https://doi.org/10.3390/s22239330>.

20. Ладанюк А. П., Смітюх Я. В., Власенко Л. О., Заєць Н. А., Ельперін І. В. Системний аналіз складних систем управління : навчальний посібник. Київ : НУХТ, 2013. 274 с. <https://dspace.nuft.edu.ua/handle/123456789/13508>.

21. Ніколаєв О. Г., Рвачова Т. В., Соловйов О. І. Функціональний аналіз : навчальний посібник. Харків : ХАІ, 2020. 164 с. <https://dspace.library.khai.edu/xmlui/handle/123456789/8128>.

22. Мокін Б. І., Мокін В. Б., Мокін О. Б. Функціональний аналіз, адаптований до прикладних задач в галузі інформаційних технологій : навчальний посібник. Вінниця : ВНТУ, 2020. 192 с. <https://ir.lib.vntu.edu.ua/handle/123456789/34634>.

23. Panchenko S. V., Lysechko V. P., Zhuchenko O. S., Indyk S. V. Multi-Level Functional Model of Performance Indicators for Ultra-Wideband Code Division Multiple Access Systems. Сучасні наукові парадигми: інтеграція знань і технологій : матеріали науково-практичної конференції, м. Вінниця, 26–27 грудня 2025 р. Одеса : Видавництво «Молодий вчений», 2025. С. 121–123. <https://molodyivchenyi.ua/omp/index.php/conference/catalog/view/164/2843/5903-1>.

24. Лисечко В. П., Жученко О. С., Індик С. В. Система показників ефективності ансамблів різноенергетичних складних сигналів для надширокополосних систем множинного доступу з кодовим розділенням. Сучасні напрями розвитку інформаційно-комунікаційних технологій та засобів управління : тези доповідей шістнадцятої міжнародної науково-технічної конференції, 29–30 квітня 2026 р. : у 5 т. Т. 5 : секція 6. Баку ; Харків ; Жиліна, 2026. С. 65–68. <https://doi.org/10.32620/ICT.26.t5>.

<https://repository.kpi.kharkov.ua/handle/KhPI-Press/101693>.

References

1. IEEE. (2007). *IEEE standard for information technology--Local and metropolitan area networks--Specific requirements--Part 15.4: Wireless medium access control (MAC) and physical layer (PHY) specifications for low-rate wireless personal area networks (WPANs): Amendment 1: Add alternate PHYs* (IEEE 802.15.4a-2007).
2. IEEE. (2020). *IEEE standard for low-rate wireless networks--Amendment 1: Enhanced ultra wideband (UWB) physical layers (PHYs) and*

associated ranging techniques (IEEE 802.15.4z-2020).

3. Indyk, S. V., Lysechko, V. P., Zhuchenko, O. S., & Kitov, V. S. (2020). The formation method of complex signals ensembles by frequency filtration of pseudo-random sequences with low interaction in the time domain. *Radio Electronics, Computer Science, Control*, (4), 7–14.
4. Zhuchenko, O. S., & Indyk, S. V. (2026). Metodolohiia otsiniuvannia efektyvnosti ansambliv riznoenerhetychnykh skladnykh sygnaliv u nadshyrokosmuhovykh systemakh mnozhynnoho dostupu z kodovym rozdilenniam [Methodology for evaluating the effectiveness of multi-energy complex signal ensembles in ultra-wideband code-division multiple access systems]. In *Zastosuvannia informatsiynykh tekhnolohii u pidhotovtsi ta diialnosti syl bezpeky i oborony: Zbirnyk tez dopovidei Mizhnarodnoi naukovo-praktychnoi konferentsii* (pp. 368–370). Natsionalna akademiia NHU.
5. Zhuchenko, O., Panchenko, S., Lysechko, V., & Indyk, S. (2026). Methodology of equivalent transformations of unequal-energy complex signal ensembles in code-division multiple access systems. *Kompiuterno-intehrovani tekhnolohii: Osvita, nauka, vyrobnytstvo* [Computer-Integrated Technologies: Education, Science, Production], (62), 337–345.
6. Gorbachov, V., Sytnikov, D., Ryabov, O., Batiaa, A. K., & Ponomarenko, O. (2020). Dimension reduction for network systems using structure model aggregation. *International Journal of Design & Nature and Ecodynamics*, 15(1), 13–23.
7. Ponomarenko, O. Ye., & Horbachov, V. O. (2023). Ahrehatsiia strukturnoi modeli skladnykh merezhykh system [Aggregation of the structural model of complex network systems]. *Systemy upravlinnia, navihatsii ta zviazku. Zbirnyk naukovykh prats* [Control, Navigation and Communication Systems. Collection of Scientific Papers], 1(71), 138–144.
8. Ponomarenko, O. Ye., & Horbachov, V. O. (2023). Programna platforma dlia otsiniuvannia efektyvnosti ahrehatsii strukturnoi modeli skladnykh system [Software platform for evaluating the efficiency of structural model aggregation of complex systems]. *Suchasnyi stan naukovykh doslidzhen ta tekhnolohii v promyslovosti* [Innovative Technologies and Scientific Solutions for Industries], (3(25)), 79–87.
9. Polishchuk, O. D. (2019). Reduktsiia skladnosti modelei merezhevykh struktur ta system [Complexity reduction of models of network structures and systems]. *Dopovidi Natsionalnoi akademii nauk Ukrainy* [Reports of the National Academy of Sciences of Ukraine], (6), 12–19.
10. Berges, J. M., Spütz, K., Jacobs, G., Kowalski, J., Zerwas, T., Berroth, J., & Konrad, C. (2022).

- Automated identification of valid model networks using model-based systems engineering. *Systems*, 10(6), Article 250.
11. Zhang, Y., Roeder, J., Jacobs, G., Berroth, J., & Hoepfner, G. (2022). Virtual testing workflows based on the function-oriented system architecture in SysML: A case study in wind turbine systems. *Wind*, 2(3), 599–616.
 12. Hoepfner, G., Kowalski, J., Faustmann, C., Zerwas, T., Kranabittl, P., Vafaei, S., Jacobs, G., & Hick, H. (2022). A classification method for the systematic identification of models and workflows in MBSE. In *DS 119: Proceedings of the 33rd Symposium Design for X (DFX2022)* (pp. 1–10).
 13. Irmich, L., Jacobs, G., Zerwas, T., & Konrad, C. (2023). Combining and evaluating function-oriented solutions in model-based systems engineering. *Forschung im Ingenieurwesen*, 87, 375–386.
 14. Horta, J., Siller, M., & Villarreal-Reyes, S. (2025). Cross-layer latency analysis for 5G NR in V2X communications. *PLOS ONE*, 20(1), Article e0313772.
 15. Rehman, A., Valentini, R., Cinque, E., Di Marco, P., & Santucci, F. (2023). On the impact of multiple access interference in LTE-V2X and NR-V2X sidelink communications. *Sensors*, 23(10), Article 4901.
 16. Halchenko, V. Ya., Trembovetska, R. V., Tychkov, V. V., & Storchak, A. V. (2020). Metody stvorennia metamodelei: Stan pytannia [Methods of metamodels creating: State of the problem]. *Visnyk Vinnytskoho politekhnichnoho instytutu* [Visnyk of Vinnytsia Polytechnical Institute], (4), 74–88.
 17. Mezzavilla, M., Miozzo, M., Rossi, M., Baldo, N., & Zorzi, M. (2012). A lightweight and accurate link abstraction model for the simulation of LTE networks in ns-3. In *MSWiM 2012: Proceedings of the 15th ACM International Conference on Modeling, Analysis and Simulation of Wireless and Mobile Systems* (pp. 55–60). Association for Computing Machinery.
 18. Wang, J., Varshney, N., Zhang, J., Griffith, D., & Golmie, N. (2021). Deep learning based link-level abstraction for mmWave communications. In *2021 IEEE SmartWorld, Ubiquitous Intelligence & Computing, Advanced & Trusted Computing, Scalable Computing & Communications, Internet of People and Smart City Innovation* (pp. 391–398). IEEE.
 19. Wu, Z., Bartoletti, S., Martinez, V., & Bazzi, A. (2022). A methodology for abstracting the physical layer of direct V2X communications technologies. *Sensors*, 22(23), Article 9330.
 20. Ladaniuk, A. P., Smitiukh, Ya. V., Vlasenko, L. O., Zaiets, N. A., & Elperin, I. V. (2013). *Systemnyi analiz skladnykh system upravlinnia: Navchalnyi posibnyk* [System analysis of complex control systems: A textbook]. NUKhT.
 21. Nikolaiev, O. H., Rvachova, T. V., & Soloviov, O. I. (2020). *Funktsionalnyi analiz: Navchalnyi posibnyk* [Functional analysis: A textbook]. KhAI.
 22. Mokin, B. I., Mokin, V. B., & Mokin, O. B. (2020). *Funktsionalnyi analiz, adaptovanyi do prykladnykh zadach v haluzi informatsiinykh tekhnolohii: Navchalnyi posibnyk* [Functional analysis adapted to applied problems in the field of information technology: A textbook]. VNTU.
 23. Panchenko, S. V., Lysechko, V. P., Zhuchenko, O. S., & Indyk, S. V. (2025). Multi-level functional model of performance indicators for ultra-wideband code division multiple access systems. In *Suchasni naukovi paradyhmy: Intehratsiia znan i tekhnolohii: Materialy naukovo-praktychnoi konferentsii* (pp. 121–123). Vydavnytstvo "Molodyi vchenyi".
 24. Lysechko, V. P., Zhuchenko, O. S., & Indyk, S. V. (2026). Systema pokaznykiv efektyvnosti ansambliv riznoenerhetychnykh skladnykh syhnaliv dlia nadshyrokosmuhovykh system mnozhynnoho dostupu z kodovym rozdilenniam [System of efficiency indicators for ensembles of multi-energy complex signals for ultra-wideband code-division multiple access systems]. In *Suchasni napriamy rozvytku informatsiino-komunikatsiinykh tekhnolohii ta zasobiv upravlinnia: Tezy dopovidei shistnadtsiatoi mizhnarodnoi naukovo-tekhnichnoi konferentsii* (Vol. 5, pp. 65–68). KhPI-Press.

Оцінювання ефективності системи множинного доступу з кодовим розділенням на основі багаторівневої функціональної моделі показників ефективності

У статті розглянуто задачу оцінювання ефективності системи множинного доступу з кодовим розділенням, у якій використовуються ансамблі різноенергетичних складних сигналів. Метою роботи є розроблення процедури оцінювання ефективності системи множинного доступу з кодовим розділенням на основі багаторівневої функціональної моделі показників ефективності з визначенням достатнього для розв'язування поставленої задачі складу рівнів моделі. У межах викладу багаторівневу функціональну модель визначено як упорядковану за ступенем узагальнення оцінок ефективності множини рівнів, кожному з яких поставлено у відповідність функціонали, що визначають показники ефективності.

Розглянуто енергетичний, структурний, потужнісно-каналний та системний рівні моделі, а також задано функціональні зв'язки між рівневими показниками і функціоналами. Повна модель зберігає послідовну структуру, у якій показник кожного вищого рівня визначається через показник попереднього суміжного рівня та параметри, що надходять на поточний рівень. Енергетичний рівень пов'язано з параметрами енергетичного складу ансамблю, структурний рівень - з параметрами взаємної кореляції сигналів, потужнісно-каналний

ІНФОРМАЦІЙНО-КЕРУЮЧІ СИСТЕМИ НА ЗАЛІЗНИЧНОМУ ТРАНСПОРТІ

рівень - з відповідним параметром каналного рівня, а системний рівень - з узагальненням результату відповідно до поставленої задачі. Розроблено алгоритм функціональної редукції, який для заданої множини варіантів визначає множину рівнів, для яких існує хоча б одна пара порівнюваних варіантів з різними значеннями відповідного рівневого функціонала, визначає редукований функціонал і впорядковує варіанти за значеннями редукованого функціонала відповідно до обраного типу задачі. Якщо для певного рівня значення відповідного рівневого функціонала однакові для всіх порівнюваних варіантів, такий рівень не входить до редукованого функціонала. У результаті алгоритм дає змогу визначити склад рівнів, функціонали яких входять до редукованого функціонала, та склад рівнів, для яких на заданій множині варіантів не виявлено відмінності значень відповідних рівневих функціоналів. Практичне значення результатів полягає у можливості виконувати оцінювання ефективності, синтез або оптимізацію системи множинного доступу з кодовим розділенням за значеннями редукованого функціонала, визначеного на основі мінімально необхідного складу рівнів для заданої множини варіантів.

Ключові слова: система множинного доступу з кодовим розділенням; складний сигнал; показник ефективності; багаторівнева функціональна модель; функціональна редукція; редукований функціонал; енергетичний рівень; структурний рівень; потужнісно-каналний рівень; системний рівень.

Panchenko Serhii, Dr. Sc. (Tech.), professor, Acting rector of the Ukrainian State University of Railway Transport. ORCID iD: 0009-0002-2833-4347. Tel.: +38 (057) 730-10-00. E-mail: info@kart.edu.ua.

Zhuchenko Oleksandr Serhiiiovych, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of Department of Transport Communication, Ukrainian State University of Railway Transport, Kharkiv, Ukraine. Tel.: +38 (063) 779-44-12. E-mail: n030201@gmail.com. ORCID ID: 0000-0003-3275-810X.

Lysechko Volodymyr Petrovych, Doctor of Technical Sciences, Professor, Ivan Kozhedub Kharkiv National Air Force University, Kharkiv, Ukraine. E-mail: lysechko@kart.edu.ua. ORCID ID: 0000-0002-1520-9515.

Indyk Serhii Volodymyrovych, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of Department of Transport Communication, Ukrainian State University of Railway Transport, Kharkiv, Ukraine. E-mail: indyk.serhii@kart.edu.ua. ORCID ID: 0000-0003-3124-8722.

Панченко Сергій Володимирович, доктор технічних наук, професор, в. о. ректора Українського державного

університету залізничного транспорту. ORCID iD: 0009-0002-2833-4347. Тел.: +38 (057) 730-10-00.

E-mail: info@kart.edu.ua.

Жученко Олександр Сергійович, кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри транспортного зв'язку, Український державний університет залізничного транспорту, Харків, Україна. Тел.: +38 (063) 779-44-12. E-mail: n030201@gmail.com. ORCID ID: 0000-0003-3275-810X.

Лисечко Володимир Петрович, доктор технічних наук, професор, Харківський національний університет Повітряних Сил імені Івана Кожедуба, Харків, Україна. E-mail: lysechko@kart.edu.ua. ORCID ID: 0000-0002-1520-9515.

Індик Сергій Володимирович, кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри транспортного зв'язку, Український державний університет залізничного транспорту, Харків, Україна. E-mail: indyk.serhii@kart.edu.ua. ORCID ID: 0000-0003-3124-8722.

Стаття надійшла 27.03.26

Стаття прийнята до друку після рецензування 27.04.26

Стаття опублікована (оприлюднена) 29.05.26

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

**Кандидати техн. наук А. О. КАГРАМАНЯН,
М. Є. РЕЗУНЕНКО,
д-р екон. наук Н. Г. ПАНЧЕНКО,
канд. техн. наук О. М. ОБОЗНИЙ**

Розроблення концепції автоматизованої системи прогнозування викидів дизелів тепловозів з урахуванням реальних умов експлуатації

***Анотація.** У статті розглянуто проблему прогнозування викидів забруднюючих речовин дизелями тепловозів в експлуатаційних умовах. Проаналізовано нормативні та наукові підходи щодо оцінювання емісії. Запропоновано інтеграцію тягових розрахунків, паливно-енергетичних параметрів і емісійних характеристик дизеля. Визначено обмеження наявних методик і доцільність створення автоматизованої системи оперативного оцінювання екологічних показників локомотива під час експлуатації на маршрутах різної складності.*

***Ключові слова:** тепловоз, дизель, прогнозування викидів, забруднюючі речовини, ремонт за фактичним технічним станом.*

Вступ.

Дизельна тяга залишається невід'ємною складовою перевізного процесу на неелектрифікованих ділянках залізничної мережі, забезпечуючи як вантажні, так і пасажирські перевезення. Водночас значну частину локомотивного парку експлуатують понад нормативні строки, що супроводжено зростанням зношеності циліндропоршневої групи, паливної апаратури та допоміжних систем. Наслідком цього є підвищені витрати палива та зростання експлуатаційних викидів оксидів азоту (NO_x), монооксиду вуглецю (CO), вуглеводнів і твердих частинок, а також збільшення обсягів викидів CO_2 як основного парникового газу.

Проблема набуває особливої актуальності в умовах посилення міжнародних вимог щодо декарбонізації транспортного сектору та підвищення стандартів якості атмосферного повітря. У європейській практиці контроль за концентраціями забруднюючих речовин у повітрі здійснюється відповідно до Директиви 2008/50/ЄС, яка встановлює граничні та цільові показники для основних домішок, зокрема NO_2 і твердих частинок (PM). Отже, навіть якщо дизельна тяга не є домінуючим джерелом забруднення в масштабі країни, у локальних зонах інтенсивного руху її внесок може бути суттєвим, особливо за умов морально та фізично застарілого рухомого складу.

Експлуатаційне прогнозування має бути базоване на інтеграції тягового розрахунку з моделлю роботи дизеля та емісійними характеристиками. Це передбачає врахування профілю колії, маси поїзда, швидкості руху, опорів руху, а також технічного стану силової установки. У такій системі витрати палива та викиди NO_x , CO, PM і показники димності розглядають не як усереднені величини, а як функції часу та режиму навантаження двигуна протягом конкретного рейсу.

© КАГРАМАНЯН А. О., РЕЗУНЕНКО М. Є., ПАНЧЕНКО Н. Г., ОБОЗНИЙ О. М., 2026

Перехід до автоматизованого прогнозування створює можливість не лише більш точно оцінювати екологічний вплив тепловозної тяги, а і використовувати екологічні показники як критерій ефективності технічного обслуговування і ремонту. За умов наявності відповідної моделі можна кількісно пов'язати зміну компресії, характеристик упорскування чи точності регулювання з очікуваною динамікою викидів у русі. Це відкриває перспективу формування системи ремонту за технічним станом, у якій екологічна складова стає повноцінним елементом ухвалення інженерних рішень.

Аналіз останніх досліджень і публікацій.

Проблема зниження шкідливих викидів від дизельного рухомого складу залізниць є актуальною як у контексті екологічної безпеки, так і аспекти підвищення енергоефективності перевізного процесу. В Україні нормування та методичні засади визначення викидів тепловозних дизелів регламентовані галузевим стандартом ГСТУ 32.001-94, який встановлює норми та методи оцінювання викидів забруднюючих речовин із відпрацьованими газами тепловозних дизелів [1]. Водночас зазначений підхід орієнтований переважно на регламентовані умови випробувань і не повною мірою враховує змінність режимів роботи локомотива в реальній експлуатації.

Міжнародна практика оцінювання емісій дизельних двигунів базована на стандартах серії ISO 8178, у яких визначено вимоги щодо систем вимірювання газоподібних і твердих забруднюючих речовин, а також типові випробувальні цикли для різних сфер застосування двигунів [2, 3]. Ці стандарти створюють важливу методичну основу для порівняння показників двигунів, однак їх використання здебільшого пов'язане зі стендовими або стандартизованими режимами, що обмежує

ІНФОРМАЦІЙНО-КЕРУЮЧІ СИСТЕМИ НА ЗАЛІЗНИЧНОМУ ТРАНСПОРТІ

можливість безпосереднього прогнозування викидів у конкретних експлуатаційних умовах руху поїзда.

На рівні європейської екологічної політики вимоги щодо контролю якості атмосферного повітря та скорочення викидів забруднюючих речовин визначені Директивою 2008/50/ЄС, Директивою (EU) 2016/2284 і Регламентом (EU) 2016/1628, який встановлює обмеження щодо викидів двигунів позашляхової техніки, до якої належить і частина залізничного тягового рухомого складу [5–7]. Зазначені документи формують нормативні передумови для вдосконалення методів контролю, оцінювання та прогнозування викидів дизельних енергетичних установок.

Для інвентаризаційних оцінок на макрорівні в європейській практиці широко використовують методику ЕМЕР/ЕЕА Guidebook, у якій для залізничного транспорту запропоновано підходи щодо розрахунку викидів за агрегованими показниками діяльності та типами рухомого складу [4]. Проте інвентаризаційні методи орієнтовані насамперед на галузевий або регіональний рівень і не забезпечують достатньої точності для прогнозування викидів конкретного локомотива на окремому маршруті з урахуванням профілю колії, ваги состава, швидкісного режиму та поточного технічного стану дизеля.

У наукових працях вітчизняних дослідників розглянуто підходи щодо розрахунку викидів забруднюючих речовин тепловозними дизелями, а також встановлено вплив основних експлуатаційних факторів на рівень емісії [8, 9]. Зокрема, показано, що величини викидів істотно залежать від режимів навантаження, витрат палива, технічного стану силової установки та умов експлуатації. Разом із тим у цих роботах обмежено розглянуто питання інтеграції тягових розрахунків із моделями утворення викидів для оперативного прогнозування екологічних показників у процесі руху.

Окремий напрям сучасних досліджень пов'язаний із вимірюванням реальних викидів локомотивів під час експлуатації. У роботі [10] показано, що фактичні показники емісії дизельного рухомого складу суттєво залежать від перехідних режимів роботи, профілю маршруту і реальних умов руху, які не повністю відтворені в стандартних випробувальних циклах. Це підтверджує необхідність розроблення підходів, орієнтованих саме на експлуатаційне прогнозування викидів.

У праці [11] показано, що перехідні режими роботи локомотивних дизелів суттєво впливають на енергетичні показники і мають бути враховані під час математичного моделювання експлуатаційних процесів. У роботі [12] досліджено емісійні фактори відпрацьованих газів дизельних локомотивів залежно від витрат палива, потужності двигуна та режиму руху. У статті [13] проаналізовано газоподібні викиди дизельного локомотива в реальних умовах експлуатації із застосуванням PEMS і встановлено зв'язок між викидами і навантаженням двигуна.

Праця [14] присвячена побудові спрощеної моделі витрат палива дизельного поїзда в реальному часі на основі експлуатаційних параметрів руху. У дослідженні [15] показано, що реальні умови руху локомотива істотно відрізняються від типових сертифікаційних режимів, а значна частка викидів сформована в режимах зупинок, холостого ходу та інтенсивних прискорень [10–15]. Отже, сучасні наукові праці підтверджують доцільність переходу від стаціонарних і усереднених оцінок до інтегрованого прогнозування викидів на основі параметрів руху, режимів роботи дизеля і фактичних умов експлуатації.

Аналіз наукових праць, нормативних документів і міжнародних методик свідчить, що існуючі підходи забезпечують нормативне оцінювання та загальне моделювання емісійних показників, проте недостатньо враховують комплекс реальних експлуатаційних факторів, які визначають обсяги викидів дизельних тепловозів у конкретних умовах руху. Це зумовлює доцільність розроблення автоматизованої системи прогнозування експлуатаційних викидів на основі інтеграції тягових розрахунків, паливно-енергетичних параметрів і характеристик утворення забруднюючих речовин [1–4, 8–15].

Визначення мети та завдання дослідження.

Метою дослідження є теоретичне обґрунтування та формування концептуальних засад автоматизованої системи прогнозування експлуатаційних викидів дизельних тепловозів, яка забезпечує визначення витрат палива і показників токсичності (NO_x, CO, PM, димність) у реальних умовах руху з урахуванням профілю колії, маси поїзда та швидкості руху.

Досягнення поставленої мети передбачає інтеграцію тягового розрахунку з моделлю роботи дизельного двигуна та емісійними характеристиками, що дасть змогу перейти від усереднених нормативних оцінок до режимно-часового прогнозу викидів у межах конкретного рейсу.

Для реалізації поставленої мети необхідно вирішити такі наукові завдання:

- обґрунтувати теоретичний зв'язок між режимами роботи дизеля та формуванням викидів шкідливих речовин;
- визначити перелік вхідних параметрів, необхідних для прогнозування викидів у русі;
- сформувати концептуальну структуру автоматизованої системи прогнозування експлуатаційних викидів;
- встановити можливості використання прогнозних показників як критерію оцінювання якості технічного обслуговування і ремонту і як інструменту переходу до ремонту за технічним станом.

Реалізація зазначених завдань створює наукову основу для переходу від контрольних екологічних вимірювань у стаціонарних умовах до

ІНФОРМАЦІЙНО-КЕРУЮЧІ СИСТЕМИ НА ЗАЛІЗНИЧНОМУ ТРАНСПОРТІ

системного управління викидами дизельної тяги в реальній експлуатації.

Основна частина дослідження.

Формування експлуатаційних викидів дизельного тепловоза є наслідком складної взаємодії тягової задачі, енергетичних характеристик силової установки та фізико-хімічних процесів згоряння палива. На відміну від стаціонарних умов, у реальному русі режими роботи дизеля визначені змінною потребою в тязі, що формується профілем колії, масою поїзда, швидкістю руху та динамікою керування. Саме тому теоретичний опис експлуатаційних викидів має ґрунтуватися на інтеграції тягового розрахунку з моделлю роботи двигуна та емісійними залежностями.

Тяговий розрахунок визначає необхідне тягове зусилля локомотива як суму сил опору руху, що включають опір коченню, аеродинамічний опір, опір на підйомах і в кривих. Маса поїзда та профіль колії формують часову змінність цього зусилля, а швидкість руху визначає співвідношення між тяговою силою та потужністю. Необхідна механічна потужність на ободі колеса через передавальні ланки трансформується в потужність, яку має розвивати дизельний двигун.

Зміна ухилу або маси поїзда викликає зміну навантаження, що позначається на корекції циклового подавання палива, тиску наддуву і тепловому стані камери згоряння. Отже, емісійні показники не є сталими характеристиками двигуна, а залежать від динаміки навантаження, сформованого умовами руху.

Формально цей зв'язок доцільно подати як послідовність перетворень «умови руху → режим роботи дизеля → витрати палива → викиди».

За наявності тягового зусилля $F_k(t)$ і швидкості руху $v(t)$ потужність на ободі колеса визначають співвідношенням

$$N_k(t) = F_k(t) \cdot v(t), \quad (1)$$

а необхідну ефективну потужність дизеля залежністю

$$N_e(t) = \frac{N_k(t)}{\eta_{tr}} + N_{aux}(t), \quad (2)$$

де η_{tr} – коефіцієнт корисної дії тягової передачі;

$N_{aux}(t)$ – потужність додаткових споживачів.

Тоді режим роботи дизеля може бути описаний вектором

$$R(t) = \{n(t), M_e(t), u(t), \dot{u}(t), S\}, \quad (3)$$

де $n(t)$ – частота обертання колінчастого вала;

$M_e(t)$ – ефективний крутний момент;

$u(t)$ – відносне навантаження;

$\dot{u}(t)$ – інтенсивність зміни навантаження;

S – сукупність параметрів технічного стану двигуна.

За таких умов миттєві витрати палива визначають як

$$G_f(t) = g_e(n(t), M_e(t), S) \cdot N_e(t), \quad (4)$$

а миттєву інтенсивність утворення j -ї забруднюючої речовини як

$$\dot{m}_j(t) = \Phi_j(R(t), G_f(t)), \quad j \in \{NO_x, CO, PM, C_xH_y\} \quad (5)$$

Відповідно, сумарний викид за рейс визначають інтегруванням:

$$M_j = \int_0^T \dot{m}_j(t) dt. \quad (6)$$

Така форма запису показує, що викиди є функцією не лише поточного навантаження, а і динаміки його зміни і технічного стану дизеля, тобто формуються в часовому просторі конкретного експлуатаційного режиму.

Питомі витрати палива дизельного двигуна визначені його характеристикою, яка встановлює зв'язок між ефективною потужністю, частотою обертання та кількістю впорскуваного палива. У зоні номінальних навантажень двигун зазвичай працює з мінімальними питомими витратами, тоді як у режимах часткового навантаження, або за частих перехідних процесів спостерігають зростання відносних втрат і зниження ефективності.

У реальній поїзній роботі дизель часто функціонує в змінних режимах, які не відповідають оптимальній точці характеристики. Часті зміни позицій контролера, короткочасні перевантаження або тривала робота на малих навантаженнях призводять до зростання середніх питомих витрат палива. Збільшення витрат палива безпосередньо корелює зі зростанням викидів CO_2 , а також впливає на концентрації інших компонентів вихлопу через зміну умов згоряння.

Процес утворення основних забруднюючих речовин у дизельному двигуні визначено температурою згоряння, співвідношенням паливо-повітря, тиском у камері згоряння і тривалістю перебування продуктів реакції в зоні високих температур. Оксиди азоту (NO_x) формуються переважно за високих температур і надлишку кисню, тому їхня концентрація зростає в режимах підвищеного навантаження та високого теплового напруження.

ІНФОРМАЦІЙНО-КЕРУЮЧІ СИСТЕМИ НА ЗАЛІЗНИЧНОМУ ТРАНСПОРТІ

Монооксид вуглецю (CO) є продуктом неповного згоряння і збільшується у випадках недостатнього перемішування, зниження температури або нестабільності процесу згоряння, що характерно для перехідних режимів і роботи на малих навантаженнях. Тверді частинки (PM) утворюються внаслідок локального перебогачення суміші та неповного окиснення вуглецевих структур, причому їхня інтенсивність суттєво зростає з перевантаженням двигуна або порушенням характеристик розпилу палива.

Димність, як оперативний експлуатаційний показник, відображає сумарний ефект сажоутворення та є чутливою до змін режиму подавання палива і повітря. У змінних режимах руху, коли навантаження дизеля швидко змінюється, можливі короткочасні піки димності, чого не фіксують під час стаціонарних випробувань.

Отже, формування експлуатаційних викидів є динамічним процесом, що визначено режимною траєкторією навантаження двигуна. Це підтверджує необхідність моделювання викидів як функції часу та зовнішніх експлуатаційних параметрів, а не як сталої питомої характеристики, отриманої в умовах стендових або реостатних випробувань.

Автоматизовану систему прогнозування експлуатаційних викидів дизельних двигунів тепловозів потрібно розглядати як інженерно-аналітичний контур, що перетворює інформацію про поїзну роботу в часові ряди режимів двигуна та відповідні часові ряди витрат палива і викидів забруднюючих речовин. Концептуально така система покликана усунути методичний розрив між квазістаціонарними оцінками, характерними для реостатних і стендових процедур, і реальними умовами руху, де визначальними є маршрутні фактори і режимні переходи. Центральною ідеєю є відтворення навантаження дизеля в кожний момент рейсу через тяговий розрахунок, після чого емісійні показники сформовані як функція отриманих режимів, а не як усереднена константа.

Вхідна інформація системи має відображати ті змінні, які детермінують потребу в тязі та, відповідно, вимоги щодо потужності. До таких параметрів належать цифровий профіль колії, що містить ухили, криві та, за можливості, дані про обмеження швидкості; маса поїзда, яка визначає інерційні та гравітаційні складові опорів руху; швидкість руху, яка задає динаміку реалізації тяги та впливає на співвідношення між тяговим зусиллям і потужністю. Оскільки швидкість є не лише наслідком тягового режиму, а й обмежена сигналізацією, графіком і режимами ведення поїзда, у системі доцільно передбачити два сценарії: прогнозування за заданим профілем швидкості (коли швидкість введена як вхідний часовий ряд) і прогнозування швидкості як результату тягової моделі за заданими обмеженнями і цільовими умовами руху.

Моделний принцип «рейс → режим → емісія» полягає в послідовному перетворенні задачі руху в параметри роботи силової установки. На першому етапі на основі профілю колії, маси та швидкості визначають сили опору руху і необхідне тягове зусилля, а також потужність на колісній парі як функцію часу або пройденої відстані. На другому етапі ця потужність, з урахуванням коефіцієнтів корисної дії тягової передачі та допоміжних втрат, трансформується у вимоги щодо ефективної потужності дизеля, а також у характерні параметри його режиму, зокрема рівень навантаження, частоту обертання і параметри паливоподавання. На третьому етапі витрати палива визначають за паливною характеристикою двигуна, після чого за емісійними залежностями обчислюють викиди NO_x, CO, твердих частинок і показники димності. Принциповим є те, що емісійна модель має бути прив'язана до режимних параметрів і може бути параметризована за результатами контрольних випробувань, але застосована до відновленої в часі експлуатаційної траєкторії навантаження (рисунок).



Рис. Концептуальна структура автоматизованої системи прогнозування експлуатаційних викидів

Запропонована система прогнозування експлуатаційних викидів набуває практичної цінності лише за умови її інтеграції з процесами технічного обслуговування та ремонту локомотивів. У цьому випадку прогнозні показники витрат палива, NO_x , CO , PM і димності розглядають не як ізольований результат моделювання, а як функціональний критерій оцінювання технічного стану дизеля та інструмент управління його життєвим циклом. Такий підхід допомагає розширити традиційну систему контролю, що ґрунтована на періодичних вимірюваннях під час реостатних випробувань, і перейти до постійного моніторингу екологічної ефективності в умовах реальної експлуатації.

У межах інтегрованої моделі екологічний критерій може бути використаний як кількісний показник якості виконаного ремонту. Після проведення ремонтних робіт прогнозні розрахунки виконують для заданих типових умов руху, що включають конкретний профіль колії, масу поїзда і максимально допустимі швидкості. Отримані значення витрат палива і викидів порівнюють з еталонними або даними перед ремонтом. Зменшення прогнозних значень CO , PM і димності за одночасної стабілізації або зниження NO_x і питомих витрат палива свідчить про відновлення оптимального процесу згоряння та підтверджує якість виконаних робіт. Натомість збереження підвищених показників або їхня небажана зміна вказують на неповну ефективність ремонту чи необхідність додаткового регулювання паливної апаратури та системи повітроподачі.

Важливим напрямом є використання системи для прогнозування деградації параметрів у міжремонтний період. Знос циліндро-поршневої групи, погіршення характеристик форсунок, порушення герметичності клапанного механізму або нестабільність роботи турбонаддуву поступово змінюють умови сумішоутворення і згоряння. Це проявляється у зростанні відносних витрат палива, збільшенні CO та димності як індикаторів неповного згоряння, а також у варіативних змінах NO_x залежно від температурного режиму. Прогнозна система дає змогу відстежувати такі тенденції не лише за результатами разових вимірювань, а через моделювання типового рейсу з фіксованими умовами, що створює уніфіковану базу для порівняння в часі. Отже, екологічні показники перетворюються на ранні маркери погіршення технічного стану, які можуть сигналізувати про необхідність втручання ще перед виникненням помітного зниження тягових характеристик.

На основі накопичених прогнозних даних відкривається можливість переходу до ремонту за технічним станом. У цій концепції рішення про ремонт ухвалюють не за календарним графіком або пробігом, а за досягненням граничних значень комплексного екологічно-енергетичного показника, сформованого на базі витрат палива і токсичності у

визначених умовах руху. Такий підхід допомагає оптимізувати інтервали між ремонтами, зменшити непродуктивні простоя та водночас підтримувати екологічні характеристики локомотива в межах допустимих значень.

Із методичної точки зору інтеграція прогнозної системи з процесами технічного обслуговування передбачає формування структурованої відповідності між типовими відхиленнями технічного стану та змінами емісійних параметрів. Це може бути реалізовано у вигляді узагальненої таблиці відповідності, яка дає змогу інтерпретувати зміни прогнозних показників як прояв конкретних дефектів або розрегулювань. Така таблиця є аналітичним інструментом для інженерного персоналу та забезпечує зв'язок між математичною моделлю і практикою деповського ремонту.

Отже, інтеграція автоматизованого прогнозування з системою технічного обслуговування і ремонту створює передумови переходу від реактивного до проактивного управління технічним станом дизелів тепловозів, у якому екологічна складова стає рівноправним критерієм разом із надійністю та енергоефективністю.

Висновки.

У результаті проведеного дослідження встановлено, що чинні національні та міжнародні методики визначення викидів дизельних двигунів тепловозів переважно орієнтовані на стаціонарні або квазістаціонарні режими роботи. Реостатні випробування і стендові процедури забезпечують контроль відповідності нормативним вимогам і допомагають отримати відтворювані показники димності та токсичності, однак не враховують динамічну структуру поїзної роботи. Факторні інвентаризаційні підходи, що застосовують для макрорівня, ґрунтовані на усереднених емісійних коефіцієнтах і не дають змогу відобразити індивідуальну режимну траєкторію конкретного рейсу.

Доведено, що формування експлуатаційних викидів дизельного тепловоза визначено сукупністю тягових і термодинамічних факторів, серед яких головну роль відіграють профіль колії, маса поїзда, швидкість руху. Саме ці параметри формують часову змінність навантаження двигуна, а отже, температуру згоряння, співвідношення паливо-повітря та умови утворення NO_x , CO , PM і показників димності. Ігнорування зазначених факторів у традиційних методиках обмежує можливість адекватного прогнозування екологічного впливу дизельної тяги в реальній експлуатації.

Наукова новизна запропонованого підходу полягає в інтеграції тягового розрахунку з моделлю роботи дизельного двигуна та емісійними характеристиками в єдину автоматизовану систему прогнозування. На відміну від існуючих методик, де викиди розглядають як сталі або усереднені величини, у роботі обґрунтовано розглядати їх як функції часу

ІНФОРМАЦІЙНО-КЕРУЮЧІ СИСТЕМИ НА ЗАЛІЗНИЧНОМУ ТРАНСПОРТІ

та режиму навантаження протягом конкретного рейсу.

Крім того, розроблено підхід щодо використання прогнозних емісійних параметрів як індикаторів деградації технічного стану і критеріїв оцінювання якості ремонту, що створює методичні передумови переходу до ремонту за технічним станом із урахуванням екологічної складової.

Впровадження запропонованого підходу створює умови для використання екологічних показників як одного з критеріїв планування технічного обслуговування і ремонту, що сприяє зниженню перевитрат палива, мінімізації викидів шкідливих речовин і підвищенню енергоефективності локомотивного парку. Застосування системи у практиці експлуатації дасть змогу забезпечити обґрунтоване управління режимами руху, оптимізацію ремонтних інтервалів і підвищення екологічної відповідності дизельної тяги сучасним вимогам.

Список використаних джерел

1. ГСТУ 32.001-94. Викиди забруднюючих речовин з відпрацьованими газами тепловозних дизелів. Норми і методи визначення. Київ : Міністерство транспорту України, 1995. 18 с.
2. ISO 8178-1:2020. Reciprocating internal combustion engines - Exhaust emission measurement - Part 1: Test-bed measurement systems of gaseous and particulate emissions. Geneva : International Organization for Standardization, 2020.
3. ISO 8178-4:2020. Reciprocating internal combustion engines - Exhaust emission measurement - Part 4: Test cycles for different engine applications. Geneva : International Organization for Standardization, 2020.
4. EMEP/EEA air pollutant emission inventory guidebook 2023. Part B: sectoral guidance chapters. 1.A.3.c Railways 2023 [Electronic resource]. European Environment Agency, 2023. Access mode: EEA website. Accessed: 17.03.2026.
5. Directive 2008/50/EC of the European Parliament and of the Council of 21 May 2008 on ambient air quality and cleaner air for Europe. *Official Journal of the European Union*. 2008. L 152. P. 1–44.
6. Directive (EU) 2016/2284 of the European Parliament and of the Council of 14 December 2016 on the reduction of national emissions of certain atmospheric pollutants. *Official Journal of the European Union*. 2016. L 344. P. 1–31.
7. Regulation (EU) 2016/1628 of the European Parliament and of the Council of 14 September 2016 on requirements relating to gaseous and particulate pollutant emission limits and type-approval for internal combustion engines for non-road mobile machinery. *Official Journal of the European Union*. 2016. L 252. P. 53–117.
8. Фалендиш А. П., Гатченко В. О., Клецька О. В. Аналіз підходів до розрахунку викидів забруднюючих речовин з відпрацьованими газами

дизелів тепловозів. *Вісник Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля*. 2017. № 3 (233). С. 228–233.

9. Каграманян А. О., Рукавішніков П. В. Дослідження впливу основних факторів експлуатації дизелів тепловозів на викиди забруднюючих речовин. *Збірник наукових праць Донецького інституту залізничного транспорту*. 2010. Вип. 21. С. 94–106.

10. Vojtisek-Lom M., Jirků J., Pechout M. Real-World Exhaust Emissions of Diesel Locomotives and Motorized Railcars during Scheduled Passenger Train Runs on Czech Railroads. *Atmosphere*. 2020. Vol. 11, No. 6. Art. 582. DOI: 10.3390/atmos11060582

11. Lebedevas S., Dailydka S., Jastremskas V., Rapalis P. The influence of locomotive diesel engine transient operating modes on energy usage. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*. 2015. Vol. 34. P. 219–229. DOI: 10.1016/j.trd.2014.10.011

12. Kim M.-K., Park D., Kim M., Heo J., Park S., Chong H. A Study on Characteristic Emission Factors of Exhaust Gas from Diesel Locomotives. *International Journal of Environmental Research and Public Health*. 2020. Vol. 17, No. 11. Art. 3788. DOI: 10.3390/ijerph17113788

13. Chong H. S., Lim Y., Lee J., Cho S., Park D. Investigation of real operation gaseous emissions from a diesel locomotive. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*. 2022. Vol. 109. Art. 103372. DOI: 10.1016/j.trd.2022.103372

14. Ahn K., Aredah A., Rakha H. A., Wei T., Frey H. C. Simple Diesel Train Fuel Consumption Model for Real-Time Train Applications. *Energies*. 2023. Vol. 16, No. 8. Art. 3555. DOI: 10.3390/en16083555

15. Urbański P., Huang Y., Gallas D., Zhou J. L., Merksiz J. Real-world assessment of the energy consumption and emissions performance of a novel diesel-electric dual-drive locomotive. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*. 2024. Vol. 71. Art. 104017. DOI: 10.1016/j.seta.2024.104017

References

1. Ministerstvo transportu Ukrainy. (1995). *Vykydy zabrudniuiuchykh rehovyn z vidpratsovanymy hazamy teplovoznykh dyzeliv. Normy i metody vyznachennia* [Emissions of pollutants with exhaust gases of diesel locomotives. Norms and methods of determination] (HSTU 32.001-94).
2. International Organization for Standardization. (2020). *Reciprocating internal combustion engines - Exhaust emission measurement - Part 1: Test-bed measurement systems of gaseous and particulate emissions* (ISO 8178-1:2020).
3. International Organization for Standardization. (2020). *Reciprocating internal combustion engines - Exhaust emission measurement - Part 4: Test cycles for different engine applications* (ISO 8178-4:2020).

4. European Environment Agency. (2023). *EMEP/EEA air pollutant emission inventory guidebook 2023. Part B: Sectoral guidance chapters. I.A.3.c railways 2023*.
5. European Parliament and Council of the European Union. (2008). Directive 2008/50/EC of the European Parliament and of the Council of 21 May 2008 on ambient air quality and cleaner air for Europe. *Official Journal of the European Union, L 152*, 1–44.
6. European Parliament and Council of the European Union. (2016). Directive (EU) 2016/2284 of the European Parliament and of the Council of 14 December 2016 on the reduction of national emissions of certain atmospheric pollutants. *Official Journal of the European Union, L 344*, 1–31.
7. European Parliament and Council of the European Union. (2016). Regulation (EU) 2016/1628 of the European Parliament and of the Council of 14 September 2016 on requirements relating to gaseous and particulate pollutant emission limits and type-approval for internal combustion engines for non-road mobile machinery. *Official Journal of the European Union, L 252*, 53–117.
8. Falendysh, A. P., Hatchenko, V. O., & Kletska, O. V. (2017). Analiz pidkhodiv do rozrakhunku vykydiv zabrudniuiuchykh rehovyn z vidpratovanymy hazamy dyzeliv teplovoziv [Analysis of approaches to calculating emissions of pollutants with exhaust gases of diesel locomotives]. *Visnyk Skhidnoukrainskoho natsionalnoho universytetu imeni Volodymyra Dalia [Bulletin of Volodymyr Dahl East Ukrainian National University]*, (3(233)), 228–233.
9. Kahramanian, A. O., & Rukavishnikov, P. V. (2010). Doslidzhennia vplyvu osnovnykh faktoriv ekspluatatsii dyzeliv teplovoziv na vykydy zabrudniuiuchykh rehovyn [Study of the influence of main factors of diesel locomotive operation on pollutant emissions]. *Zbirnyk naukovykh prats Donetskoho instytutu zaliznychnoho transportu [Collection of Scientific Papers of the Donetsk Institute of Railway Transport]*, (21), 94–106.
10. Vojtisek-Lom, M., Jirků, J., & Pechout, M. (2020). Real-world exhaust emissions of diesel locomotives and motorized railcars during scheduled passenger train runs on Czech railroads. *Atmosphere, 11*(6), Article 582. <https://doi.org/10.3390/atmos11060582>
11. Lebedevas, S., Dailydka, S., Jastremskas, V., & Rapalis, P. (2015). The influence of locomotive diesel engine transient operating modes on energy usage. *Transportation Research Part D: Transport and Environment, 34*, 219–229. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2014.10.011>
12. Kim, M.-K., Park, D., Kim, M., Heo, J., Park, S., & Chong, H. (2020). A study on characteristic emission factors of exhaust gas from diesel locomotives. *International Journal of Environmental Research and Public Health, 17*(11), Article 3788. <https://doi.org/10.3390/ijerph17113788>
13. Chong, H. S., Lim, Y., Lee, J., Cho, S., & Park, D. (2022). Investigation of real operation gaseous emissions from a diesel locomotive. *Transportation Research Part D: Transport and Environment, 109*, Article 103372. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2022.103372>
14. Ahn, K., Aredah, A., Rakha, H. A., Wei, T., & Frey, H. C. (2023). Simple diesel train fuel consumption model for real-time train applications. *Energies, 16*(8), Article 3555. <https://doi.org/10.3390/en16083555>
15. Urbański, P., Huang, Y., Gallas, D., Zhou, J. L., & Merksiz, J. (2024). Real-world assessment of the energy consumption and emissions performance of a novel diesel-electric dual-drive locomotive. *Sustainable Energy Technologies and Assessments, 71*, Article 104017. <https://doi.org/10.1016/j.seta.2024.104017>

PhD (Tech) A. Kagramanian, PhD (Tech) M. Rezunenکو, Dr. Sc. (Econ) N. Panchenko, PhD (Tech) O. Oboznyi

DEVELOPMENT OF THE CONCEPT FOR AN AUTOMATED SYSTEM FOR PREDICTING DIESEL LOCOMOTIVE EMISSIONS WITH CONSIDERATION OF REAL OPERATING CONDITIONS

Abstract. *The article deals with forecasting pollutant emissions from diesel locomotives under real operating conditions. The study is relevant due to stricter environmental requirements for railway transport, the need to improve ecological assessment of traction rolling stock, and the limitations of existing standardized and inventory-based approaches that do not fully reflect route-specific operating variability. Current regulatory, methodological, and scientific approaches to emission assessment are analyzed, including national standards, international engine emission measurement procedures, European environmental requirements, and recent studies on real-world locomotive emissions.*

It is shown that existing methods are mainly focused on bench testing, certification, or aggregate inventory calculations and therefore are not sufficiently suitable for operational prediction of emissions during train movement. Special attention is given to the influence of traction load, fuel consumption, transient engine operation, train mass, route profile, and speed conditions on emission formation. On this basis, the need to develop an automated system for forecasting operational emissions of diesel locomotives is substantiated.

The proposed approach is based on integrating traction calculations, fuel and energy parameters, and diesel engine emission characteristics. This makes it possible to move from generalized estimates to route-specific prediction of environmental indicators for a particular locomotive under defined operating conditions.

The practical significance of the study lies in the possibility of using these principles for environmental assessment of locomotive operation, comparison of operating modes, support of energy-efficient train control, and further development of digital decision-support tools for railway transport. The obtained results may also be used as a methodological basis for improving environmental monitoring procedures.

Keywords: *locomotive, diesel engine, emission forecasting, pollutants, condition-based maintenance.*

Стаття надійшла 16.03.26

Стаття прийнята до друку після рецензування 14.04.26

Стаття опублікована (оприлюднена) 29.05.26

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

Каграманян Артур Олександрович, канд.техн. наук, доцент, проректор із науково-педагогічної роботи, Український державний університет залізничного транспорту. ORCID iD: 0000-0003-3520-4911. Тел.: +38 (050) 630-31-60. E-mail: kartal2@ukr.net.

Резуненко Марина Євгенівна, канд.техн. наук, доцент, завідувачка кафедри вищої математики та фізики, Український державний університет залізничного транспорту. ORCID iD: 0000-0003-2073-5242. Тел.: +38 (095) 320-52-89. E-mail: rezunenko@kart.edu.ua.

Панченко Наталія Георгіївна, д-р екон. наук, доцент, професор кафедри вищої математики та фізики, Український державний університет залізничного транспорту. ORCID iD: 0000-0003-2195-202X. Тел.: +38 (095) 076-40-37. E-mail: panchenko_n@kart.edu.ua.

Обозний Олександр Миколайович, канд. техн. наук, доцент кафедри експлуатації та ремонту рухомого складу, Український державний університет залізничного транспорту. ORCID iD: 0000-0002-0843-6023. Тел.: +38 (050) 303-45-59. E-mail: obozny@kart.edu.ua.

Kagramanian Artur, PhD (Tech.), associate professor, Vice-Rector for Research and Education, Ukrainian State University of Railway Transport. ORCID iD: 0000-0003-3520-4911.

Тел.: +38 (050) 630-31-60. E-mail: kartal2@ukr.net.

Rezunenko Maryna, PhD (Tech.), associate professor, Head of the Department of Higher Mathematics and Physics, Ukrainian State University of Railway Transport. ORCID iD: 0000-0003-2073-5242. Тел.: +38 (095) 320-52-89. E-mail: rezunenko@kart.edu.ua.

Panchenko Natalia, Dr. Sc. (Econ), associate professor, Professor of the Department of Higher Mathematics and Physics, Ukrainian State University of Railway Transport. ORCID iD: 0000-0003-2195-202X. Тел.: +38 (095) 076-40-37. E-mail: panchenko_n@kart.edu.ua.

Oboznyi Oleksandr, PhD (Tech.), associate professor, department of maintenance and repair of rolling stock, Ukrainian State University of Railway Transport. ORCID iD: 0000-0002-0843-6023. Тел.: +38 (050) 303-45-59. E-mail: obozny@kart.edu.ua.

ФІЛІМОНЧУК Т. В., к.т.н, доцент,
КОЛТУН Ю.М., к.т.н, доцент,
МАСЛОВ М.К., магістр,
Харківський національний університет радіоелектроніки

Адаптивна модель розпізнавання техніки з механізмами уваги на базі YOLOv11

Анотація. *Актуальність* дослідження зумовлена необхідністю підвищення ефективності систем комп'ютерного зору в умовах сучасної війни, де стрімкий розвиток безпілотних літальних апаратів і засобів розвідки потребує надійних інструментів для автоматизованого виявлення військової техніки в реальному часі. Існуючі детектори, попри високу швидкодію, демонструють зниження точності в разі роботи з малорозмірними, замаскованими об'єктами або в умовах складної фонові обстановки через втрату просторової інформації під час згорткових операцій. У зв'язку з цим удосконалення моделі архітектури нейронних мереж через інтеграцію механізмів уваги та оптимізацію обчислювальних процесів набуває особливої значущості. **Об'єктом дослідження** є процес автоматизованого виявлення та локалізації об'єктів військового призначення у відеопотоці оптичного діапазону. **Предметом дослідження** є методи структурної модифікації архітектури згорткової нейронної мережі YOLO з використанням механізмів координатної уваги та розділених детекторних модулів. **Результати.** У роботі запропоновано та реалізовано модифіковану модель архітектури нейромережі, головною особливістю якої є точкова інтеграція полегшеного модуля координатної уваги (Lite CA) перед шаром пірамідальної агрегації ознак, що дало змогу здійснити декомпозицію процесу просторового кодування, зберігши точну позиційну інформацію, яку зазвичай втрачають за стандартного глобального усереднення. Впровадження в модель складової «детекторна частина» забезпечило незалежну обробку задач класифікації та регресії координат. Експериментально підтверджено, що адаптивна модель досягає показника середньої точності mAP@0.5 на рівні 0.651, що на 8 % перевищує базовий рівень, і демонструє суттєве зростання повноти виявлення. **Висновки.** Запропонований підхід забезпечує ефективний баланс між точністю локалізації та обчислювальною складністю, гарантуючи високу стійкість детектора щодо візуальних перешок та ефектів камуфляжу. Розроблена модель рекомендована для впровадження в автономні системи ситуаційної обізнаності та цілевказання, допомагаючи мінімізувати помилки пропуску цілі в бойових умовах.

Ключові слова: YOLOv11, СВМ, механізм уваги, детекція об'єктів, комп'ютерний зір, трансферне навчання, згорткові нейронні мережі, Python, PyTorch.

Постановка проблеми

В умовах сучасного бойового простору важливим фактором успіху є досягнення інформаційної переваги та ситуаційної обізнаності. Візуальна інформація надходить із різномірних джерел: бортових систем прицілювання та спостереження бронетехніки (танків, БМП, БТР), камер стаціонарних спостережних пунктів, а також безпілотних літальних апаратів. Масив відеоданих формує складне інформаційне середовище, ефективний аналіз якого людиною-оператором у режимі реального часу є ускладненим через фізичну втому, стрес і динаміку бойових дій.

На сьогодні стандартом для автоматизованої детекції об'єктів є нейромережеві архітектури сімейства YOLO (You Only Look Once), які завдяки високій швидкодії можуть бути розгорнуті на бортових обчислювачах мобільних платформ. Однак базові алгоритми YOLO, навчені на стандартних наборах даних, демонструють суттєве зниження ефективності в разі роботи в реальних умовах експлуатації військової техніки.

© ФІЛІМОНЧУК Т. В., КОЛТУН Ю.М., МАСЛОВ М.К., 2026

Основними проблемами, що виникають з обробкою відеопотоків із зазначених джерел, є такі:

- деградація візуального сигналу: відеоряд із камер бронетехніки або польових пунктів спостереження часто спотворений через вібрації під час руху, запиленість оптики, задимлення, складні погодні умови або низьку роздільну здатність сенсорів (тепловізорів, нічних прицілів). Стандартні згорткові мережі сприймають ці візуальні дефекти як шум, що призводить до пропуску цілей;

- варіативність ракурсів і масштабів: система має однаково ефективно розпізнавати техніку як у фронтальній проєкції (вигляд з екрана навідника танка/БТР на рівні землі), так і верхній проєкції (вигляд з БПЛА). Базові моделі часто мають обмежену здатність генералізації таких різномірних просторових ознак;

- маскування та часткове перекриття (Occlusion): в умовах наземного бою техніка противника часто використовує природні укриття (лісосмуги, складки рельєфу) або засоби маскування (сітки, «накидки»).

ІНФОРМАЦІЙНО-КЕРУЮЧІ СИСТЕМИ НА ЗАЛІЗНИЧНОМУ ТРАНСПОРТІ

Локальні рецептивні поля стандартних CNN не дають змогу ефективно виокремити об'єкт, якщо видима лише його незначна частина (наприклад лише башта або гусениці).

Наукова задача полягає в модифікації архітектури нейронної мережі YOLO через інтеграцію механізмів уваги (Attention Mechanisms), зокрема модуля СВAM, що допоможе створити адаптивну систему, здатну динамічно перерозподіляти «увагу» мережі на найбільш інформативні ділянки кадру, ігноруючи перешкоди та фон. Таке рішення забезпечить підвищення точності та надійності автоматизованого цілевказання як для екіпажів бойових машин, так і операторів пунктів спостереження, незалежно від типу відеосенсора.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Для сучасного етапу розвитку систем комп'ютерного зору характерне активне впровадження нейромережових архітектур сімейства YOLO, які стали стандартом де-факто для задач детекції об'єктів у реальному часі. Аналіз наукової періодики свідчить про зміщення фокусу досліджень від простого підвищення точності до оптимізації архітектур для роботи в складних умовах (обмежені обчислювальні ресурси, малі об'єкти, перешкоди) і глибокої інтеграції додаткових механізмів уваги.

У фундаментальній оглядовій роботі [1] проведено глибокий системний аналіз еволюції архітектур YOLO від першої версії до найновіших ітерацій YOLOv8 і YOLO-NAS. Наукова новизна роботи полягає в детальному розборі переходу від якірних (anchor-based) до безякірних (anchor-free) підходів, що дало змогу значно спростити процес навчання та підвищити генералізацію моделі. Автори детально розглядають структурні зміни в блоках Backbone, зокрема заміну модулів C3 на більш градієнтно-ефективні C2f, а також повну реструктуризацію елемента «Голова» (Head) на відокремлені гілки (decoupled head) для класифікації та регресії координат. Особливу увагу приділено проблемі компромісу між швидкістю інференсу і точністю (mAP), де новітні моделі демонструють значну перевагу завдяки використанню методів автоматичного пошуку нейронної архітектури (Neural Architecture Search, NAS).

У роботі [2] комплексно досліджено проблему оптимізації моделей YOLOv8 для задач розпізнавання специфічних цілей в умовах обмежених вибірок даних. Ноу-хау авторів полягає в розробленні адаптивної стратегії навчання, що враховує залежність ефективності детекції від роздільної здатності вхідного зображення та масштабу цільових об'єктів. Автори провели серію експериментів із різними розмірностями моделі (nano, small, medium) і довели, що просте збільшення глибини мережі не завжди призводить до покращення результатів на малих об'єктах. Натомість критично важливим фактором визначено етап попередньої обробки даних

(Data Preprocessing) і використання просунутих технік аугментації, таких як Mosaic і Mixup, що допомагає моделі «бачити» об'єкти в нових контекстах. Результати підтверджують, що правильне налаштування гіперпараметрів (зокрема learning rate scheduler) дає змогу легким моделям досягати точності, порівнянної з важкими архітектурами, але за значно менших обчислювальних витрат.

У дослідженні [3] запропоновано практичну реалізацію end-to-end системи розпізнавання об'єктів на базі YOLO, акцентуючи на безшовній інтеграції нейромережі з апаратними модулями відеоспостереження. Основну увагу приділено технічним аспектам розгортання моделі (Deployment) у реальних умовах експлуатації, де критичними факторами є динамічні зміни освітлення, погодні умови та складні ракурси зйомки. Автори проаналізували вплив різних форматів вхідного відеопотоку (RTSP, HTTP) на затримку (latency) обробки та запропонували алгоритм буферизації кадрів, що мінімізує пропуски детекції за різних рухів камери. Експериментально доведено, що використання оптимізованих тензорних ядер GPU у поєднанні з архітектурою YOLO допомагає досягти стабільного фреймрейту (FPS) вище 30 кадрів за секунду навіть для обробки зображень високої чіткості, що є критичним показником для систем безпеки та моніторингу периметра.

Окремий напрям досліджень, висвітлений у роботі [4], стосується складного завдання ідентифікації та супроводу рухомих об'єктів (Object Tracking). Автори пропонують комплексний підхід щодо побудови системи, яка не лише детектує об'єкти в кожному кадрі, але й відновлює їхні траєкторії руху, розв'язуючи проблему перекриття (occlusion). У статті детально проаналізовано ефективність інтеграції детектора YOLO з алгоритмами трекінгу, такими як SORT і DeepSORT. Основним висновком із роботи є те, що стабільність трекінгу безпосередньо корелює з якістю роботи детектора: навіть незначні помилки в локалізації (bounding box) призводять до збоїв в ідентифікації (ID switch). Автори демонструють, як модифікація згорткових шарів для кращого виділення просторових ознак допомагає зменшити кількість помилкових спрацьовувань на складних фонах, підвищуючи загальну надійність системи моніторингу.

У роботі [5] розглянуто вузькоспеціалізоване застосування нейромережових технологій для виявлення небезпечних об'єктів (зокрема вибухонебезпечних предметів) у вкрай складних візуальних середовищах, включаючи підводну зйомку. Автор досліджує методи адаптації архітектур YOLO для роботи із зображеннями низької якості з низьким контрастом, розмиттям і специфічними кольоровими спотвореннями. Запропонована методологія включає використання трансферного навчання (Transfer Learning), коли модель попередньо тренується на великих загальних датасетах, а потім донавчається (fine-tuning) на специфічних даних. Ноу-

ІНФОРМАЦІЙНО–КЕРУЮЧІ СИСТЕМИ НА ЗАЛІЗНИЧНОМУ ТРАНСПОРТІ

хау полягає у використанні спеціальних фільтрів попередньої обробки зображень для підкреслення країв об'єктів перед подаванням їх у нейромережу. Цей підхід є релевантним для будь-яких задач, де об'єкти мають складну форму або частково замасковані середовищем.

У роботі [6] наведено альтернативний підхід щодо детекції, базований на архітектурі трансформерів (Vision Transformers), а саме RT-DETR (Real-Time DETection TRansformer). На відміну від згорткових мереж, таких як YOLO, що аналізують локальні ознаки, трансформери використовують механізм глобальної уваги (Self-Attention) для розуміння контексту всього зображення. Автори порівнюють ефективність YOLOv8 і RT-DETR і зазначають, що трансформерні моделі краще справляються з ситуаціями сильного перекриття об'єктів і відсутності чітких візуальних ознак. Хоча трансформери потребують більше ресурсів для навчання, їхня здатність моделювати довгі залежності між пікселями підкреслює критичну важливість використання механізмів уваги для досягнення високої точності детекції в складних умовах.

У роботі [7] запропоновано концептуальну модель системи управління процесами розпізнавання образів, яка базована на інтеграції сучасних методів штучного інтелекту. Автори фокусують увагу на проблемі побудови адаптивних систем, здатних ефективно функціонувати в умовах динамічного вхідного потоку даних. Наукова цінність дослідження полягає в розробленні структурної схеми, яка систематизує етапи життєвого циклу моделі: від попередньої обробки даних до валідації результатів. Автори зазначають, що просте використання потужної архітектури (CNN) без належної організації конвеєра обробки даних та управління параметрами не гарантує стабільності результату. Цей підхід корелює з необхідністю оптимізації архітектури типу YOLO для специфічних задач, підтверджуючи важливість комплексного підходу щодо проєктування систем комп'ютерного зору, де алгоритми розпізнавання тісно пов'язані з модулями ухвалення рішень.

Узагальнюючи проведений аналіз наукових джерел [1-7], можна зробити висновок, що існуючі базові моделі детекції (зокрема стандартні версії YOLO) забезпечують високу швидкість, проте мають суттєві обмеження для роботи в складних умовах експлуатації. Основними недоліками є втрата інформації про малорозмірні об'єкти в процесі згорткових перетворень, недостатня стійкість щодо візуальних перешкод (маскування, погане освітлення) і відсутність механізмів глобального фокусування уваги, притаманних трансформерним архітектурам.

Більшість розглянутих рішень сфокусовано на окремих аспектах: або попередній обробці даних, або архітектурних змінах, або оптимізації інференсу. Проте для досягнення високої точності та надійності в системах ситуаційної обізнаності необхідний комплексний підхід.

На основі цього виникає необхідність розроблення вдосконаленої моделі, яка б поєднувала ефективність згорткових мереж з адаптивністю механізмів уваги. Формально узагальнену модель автоматизованої системи детекції MASD можна подати як впорядкований кортеж функціональних компонентів:

$$M_{ASD} = (PreP, FE, FPN, DH, LFn, InfE), \quad (1)$$

де PreP (Preprocessing module) – модуль базової попередньої обробки;

FE (Feature Extractor) – стандартний екстрактор ознак Backbone;

FPN (Feature Pyramid Network) – класичний модуль агрегації ознак без механізмів уваги;

DH (Detection Head) – детекторна частина;

LFn (Loss Function) – функція втрат;

InfE (Inference Engine) – підсистема інференсу.

Зазначена формалізація дає змогу чітко визначити напрям подальшого дослідження як оптимізацію кожного з наведених компонентів для досягнення ефекту з точності та швидкодії системи.

Мета дослідження

Метою дослідження є підвищення ефективності автоматизованого виявлення та класифікації об'єктів військової техніки у відеопотоці реального часу через структурну модифікацію архітектури згорткової нейронної мережі YOLO. Досягнення мети забезпечено через інтеграцію в модуль агрегації ознак механізму координатної уваги та впровадження механізму незалежної обробки задач класифікації та локалізації, що в поєднанні зі стохастичними методами аугментації допомагає системі адаптивно фокусуватися на інформативних ділянках зображення, гарантуючи стійку селекцію малорозмірних і замаскованих цілей в умовах складної фонові обстановки.

Викладення основного матеріалу

Сучасна парадигма ведення бойових дій зазнає фундаментальних змін із впливом тотальної цифровізації та роботизації поля бою. Важливим фактором, що визначає тактичну перевагу, стає не лише вогнева міць, а і швидкість циклу ухвалення рішень (OODA loop), яка безпосередньо залежить від ефективності розвідувальних систем. У цьому контексті критичного значення набувають технології комп'ютерного зору, інтегровані в безпілотні авіаційні комплекси та системи управління вогнем, оскільки вони дають змогу автоматизувати процес виявлення та ідентифікації цілей без безпосередньої участі оператора, мінімізуючи людський фактор і час реакції.

На сьогодні стандартом у задачах детекції об'єктів реального часу є використання глибоких згорткових нейронних мереж (CNN), зокрема

ІНФОРМАЦІЙНО–КЕРУЮЧІ СИСТЕМИ НА ЗАЛІЗНИЧНОМУ ТРАНСПОРТІ

одностадійних детекторів архітектури YOLO. Їх широке розповсюдження зумовлене архітектурною здатністю виконувати передбачення класів і координат об'єктів за один прохід мережі, що забезпечує високу кадрову частоту обробки навіть на вбудованих обчислювальних платформах з обмеженим енергоспоживанням (Edge AI). Останні ітерації цієї архітектури, такі як YOLO, демонструють вражаючі результати на стандартних еталонних наборах даних, використовуючи вдосконалені методи агрегації ознак та оптимізовані функції активації.

Однак, незважаючи на загальну ефективність, застосування базових архітектур CNN у специфічних умовах військового моніторингу виявляє низку критичних недоліків. Фундаментальна проблема полягає в природі операції згортки, яка оперує в межах обмеженого локального рецептивного поля. Із проходженням сигналу через глибокі шари мережі та операції зниження дискретизації (downsampling) просторову інформацію про малорозмірні об'єкти часто втрачають або вона «розмита» на фоні високочастотного шуму.

Ситуація значно ускладнена специфікою вхідних даних у бойових умовах. Військова техніка часто має низький візуальний контраст відносно навколишнього середовища, використовує камуфляжне фарбування, маскувальні сітки або знаходиться в умовах природного затінення. Крім того, фактори навколишнього середовища, такі як атмосферні опади, туман, задимленість або низька освітленість, створюють складні візуальні патерни, які стандартна згорткова мережа може інтерпретувати як частину ландшафту. У таких умовах стандартні механізми вилучення ознак є недостатньо селективними, що призводить до зростання помилок першого (пропуск цілі) і другого (хибне спрацювання) роду.

Традиційні методи розв'язання цієї проблеми простим збільшенням глибини або ширини нейронної мережі є неприйнятними для систем військового призначення, оскільки це призводить до експоненційного зростання обчислювальної складності та затримок інференсу, що є критичним для задач реального часу. Отже, виникає необхідність пошуку архітектурних рішень, які б допомогли підвищити чутливість мережі до значущих ознак без суттєвого збільшення обчислювального навантаження.

Перспективним напрямом подолання описаних обмежень є інтеграція в архітектуру детектора механізмів уваги (Attention Mechanisms). На відміну від стандартних згорток, які обробляють усі пікселі зображення з однаковим пріоритетом, механізми уваги дають змогу мережі динамічно перерозподіляти ваги, фокусуючись на найбільш інформативних просторових зонах або каналних ознаках. Зокрема, механізми, подібні до інтегрованого блока координатної уваги (Coordinate Attention), здатні моделювати довгострокові залежності та кодувати

точну позиційну інформацію, яку зазвичай втрачають із використанням глобального усереднення.

Для розв'язання поставленої науково-технічної задачі подано модифіковану модель автоматизованої системи детекції, яка інтегрує класичні згорткові методи вилучення ознак із новітніми механізмами просторової та каналної уваги. Запропонована архітектура базована на платформі YOLOv11, суттєво вдосконаленій через впровадження блоків Coordinate Attention та оптимізацію конвеєра попередньої обробки даних. Такий підхід допомагає подолати обмеження стандартних детекторів для роботи з малорозмірними та замаскованими об'єктами в складних умовах спостереження.

Формально запропоновану модель системи детекції об'єктів (ODS) можна описати як упорядкований кортеж функціональних компонентів:

$$ODS = \{PreP, FE, FPN_{CA}, DH, LFn, InfE\}, \quad 2)$$

де PreP (Preprocessing module) – модуль попередньої обробки та аугментації даних;

FE (Feature Extractor) – модуль вилучення ознак (Backbone);

FPN_{CA} (Feature Pyramid Network with attention) – модифікований модуль агрегації ознак;

DH (Detection Head) – детекторна частина;

LFn (Loss Function mechanism) – механізм обчислення функції втрат;

InfE (Inference Engine) – програмний рушій виконання моделі.

Структурна унікальність запропонованого рішення базована на комплексному вдосконаленні базових підходів. По-перше, модуль попередньої обробки (PreP) розширено алгоритмами стохастичної трансформації, що забезпечує інваріантність детектора до геометричних спотворень і змін освітлення. По-друге, архітектура нейронної мережі модифікована через інтеграцію механізму СА у модуль агрегації ознак FPN_{CA}, що дає змогу системі враховувати глобальний контекст і зберігати точну позиційну інформацію, яка зазвичай нівельована під час зниження просторової розмірності. По-третє, для забезпечення роботи в реальному часі розроблено InfE, яка оптимізує взаємодію з апаратним забезпеченням і стабілізує відеопотік.

Порівняно з традиційними підходами запропонована модель забезпечує вищу точність локалізації об'єктів завдяки адаптивному фокусуванню уваги, зберігаючи при цьому високу швидкодію, характерну для одностадійних детекторів. Використання принципів трансферного навчання дає змогу ефективно адаптувати систему до специфічних класів об'єктів навіть за умови обмеженого обсягу навчальних даних. Усі модулі системи реалізовані мовою Python із використанням бібліотек глибокого навчання, що забезпечує гнучкість і масштабованість рішення.

ІНФОРМАЦІЙНО-КЕРУЮЧІ СИСТЕМИ НА ЗАЛІЗНИЧНОМУ ТРАНСПОРТІ

Функціонування наведеної системи детекції розпочинається з роботи модуля PreP, який реалізує комплексний підхід щодо підготовки вхідних даних. Формально структуру модуля попередньої обробки можна подати як сукупність алгоритмів трансформації даних:

$$\text{PreP} = \{ \text{MDA}, \text{MixUp}, \text{Aug}_{\text{HSV}}, \text{Aug}_{\text{Geom}} \}, \quad (3)$$

де MDA (Mosaic Data Augmentation) – алгоритм мозаїчного суміщення кадрів;

MixUp – метод лінійного змішування зображень;

Aug_{HSV} – фотометричні спотворення в колірному просторі;

Aug_{Geom} – геометричні афінні трансформації.

В умовах реального бойового застосування, де відеопотік надходить із камер безпілотних літальних апаратів (БПЛА) або наземних роботизованих платформ, вхідні зображення мають високу варіативність масштабу, ракурсу та умов освітлення. У таких сценаріях класичний підхід щодо попередньої обробки, що обмежений детермінованою зміною розміру (resize) до вхідної роздільної здатності мережі (наприклад 640 на 640 пікселів), виявляється недостатнім. Просте масштабування часто призводить до втрати дрібних деталей, критично важливих для розпізнавання малорозмірних об'єктів, і не забезпечує необхідну інваріантність моделі до геометричних спотворень.

Для розв'язання цієї проблеми в модулі PreP реалізовано концепцію стохастичної трансформації, яка має на меті штучне розширення простору ознак навчальної вибірки. Реалізація запропонованої методики дає змогу наблизити розподіл даних, на якому навчається модель, до реального розподілу візуальних сцен на полі бою.

Важливим елементом стратегії аугментації є алгоритм мозаїчного суміщення (MDA). На відміну від традиційних методів, які оперують поодинокими зображеннями, MDA формує один навчальний зразок через синтез чотирьох випадкових зображень із датасету. Процес генерації мозаїки складається з таких етапів:

- вибірка та ініціалізація: вибирають індекси чотирьох випадкових зображень I_1, I_2, I_3, I_4 ;

- генерують цільове полотно розміром $W \times H$;

- визначення точки центрування: генерують випадкову точку перетину (x_c, y_c) у межах заданого діапазону координат, яка стає центром стикування чотирьох зображень;

- компоновання та обрізка: кожне з чотирьох зображень розміщено у відповідному квадранті відносно точки (x_c, y_c) . Частина зображень, що виходять за межі цільового вікна розміром $W \times H$ навколо центру, відсікають.

Математична логіка функціонування алгоритму MDA передбачає перерахунок координат обмежувальних рамок (Bounding Boxes) для кожного

об'єкта відносно нових меж синтезованого зображення. Після зміщення фрагмента на вектор dx, dy нові координати (x', y') обчислюють з урахуванням кліпінгу (обрізання) за шириною W і висотою H полотна:

$$B = \begin{cases} x'_{\min} = \max(0, x_{\min} + dx) \\ y'_{\min} = \max(0, y_{\min} + dy) \\ x'_{\max} = \min(W, x_{\max} + dx) \\ y'_{\max} = \min(H, y_{\max} + dy) \end{cases}, \quad (4)$$

де $x'_{\min}, y'_{\min}, x'_{\max}, y'_{\max}$ – координати вершин обмежувальної рамки на новому полотні мозаїки;

$x_{\min}, y_{\min}, x_{\max}, y_{\max}$ – початкові координати рамки об'єкта на вихідному зображенні;

dx, dy – вектори зміщення зображення відносно центра мозаїки;

W, H – ширина та висота цільового зображення для навчання.

Якщо площа нової рамки стає меншою за порогове значення, об'єкт виключають із розмітки.

Використання алгоритму MDA дає системі суттєві переваги: по-перше, дає змогу моделі ефективно навчатися розпізнавати об'єкти, що знаходяться на периферії кадру (частково обрізані), що є типовим для відеопотоку з рухомого дрона. По-друге, через значне варіювання масштабу з компонованням мережа стає більш чутливою до малорозмірних цілей. По-третє, завдяки наявності об'єктів із чотирьох різних сцен в одному тензорі стабілізовано обчислення статистик Batch Normalization, що допомагає ефективно навчати модель навіть за малого розміру батчу (Mini-batch size).

Для підвищення завадостійкості моделі щодо візуальних перешкод та ефекту накладання об'єктів застосовують алгоритм MixUp, в основі якого лежить принцип навчання на віртуальних прикладах, отриманих опуклою комбінацією пар зображень і їхніх міток.

Формально для двох випадкових пар «зображення-мітка» новий навчальний приклад \tilde{x}, \tilde{y} розраховують за формулами лінійної інтерполяції:

$$\begin{aligned} \tilde{x} &= \lambda x_i + (1 - \lambda) x_j \\ \tilde{y} &= \lambda y_i + (1 - \lambda) y_j \end{aligned},$$

де $\lambda [0, 1]$ – коефіцієнт змішування.

У контексті детекції військової техніки візуальний результат роботи алгоритму MixUp нагадує напівпрозоре накладання одного об'єкта на інший або на фоновий ландшафт, що дає змогу емулювати реальні фізичні явища:

ІНФОРМАЦІЙНО-КЕРУЮЧІ СИСТЕМИ НА ЗАЛІЗНИЧНОМУ ТРАНСПОРТІ

- сприйняття об'єктів через середовища, що розсіюють світло (туман, дим, пилова завіса);

- ефект часткової прозорості маскувальних сіток;

- візуальне злиття камуфльованого об'єкта зі складним фоном (лісосмуга, міська забудова).

Регуляризаційний ефект MixUp запобігає перенаванчання мережі та «запам'ятовуванню» чітких контурів, змушуючи модель покладатися на більш робастні ознаки.

Фінальним етапом у конвеєрі PreP є застосування фотометричних Aug_{HSV} і геометричних Aug_{Geom} спотворень. Колірна корекція відбувається у просторі HSV (Hue, Saturation, Value), оскільки він краще відповідає людському сприйняттю кольору, ніж RGB. Для кожного зображення виконано стохастичний зсув каналів:

$$\begin{aligned} H_{\text{new}} &= (H + \delta_h) \bmod 180 \\ S_{\text{new}} &= \text{clip}(S \cdot \delta_s) \\ V_{\text{new}} &= \text{clip}(V \cdot \delta_v) \end{aligned} \quad (6)$$

де H_{new} , S_{new} , V_{new} – модифіковані значення відтінку, насиченості та яскравості пікселя відповідно;

H , S , V – початкові значення компонентів у колірному просторі HSV;

δ_h , δ_s , δ_v – випадкові коефіцієнти мультиплікативного шуму для кожного каналу;

$\text{clip}()$ – функція обмеження значень у допустимому діапазоні $[0, 255]$.

Застосування колірних корекцій відтворює варіативність умов освітлення (яскраве сонце, хмарність, сутінки) і спектральні особливості камер. Геометричні трансформації Aug_{Geom} включають випадкові повороти, віддзеркалення та перспективні викривлення, гарантуючи інваріантність детектора до положення камери відносно горизонту.

Після попередньої обробки вхідний тензор надходить до модуля вилучення ознак (FE), який виконує функцію Backbone нейронної мережі. Архітектурно цей модуль визначено як композицію таких функціональних блоків:

$$FE = \{CSPNet, C2f, SPPF\}, \quad (7)$$

де CSPNet (Cross Stage Partial Network) – базова концепція мережі з частковими перехресними стадіями;

C2f (Cross Stage Partial Bottleneck with 2 convolutions) – модифікований блок агрегації градієнтів;

SPPF – модуль швидкої пірамідальної агрегації просторових ознак.

Архітектурна парадигма модуля FE базована на концепції мережі з частковими перехресними стадіями (CSPNet), яка була спеціально розроблена

для розв'язання проблеми надлишковості градієнтної інформації в глибоких згорткових мережах.

Фундаментальна ідея CSPNet полягає в розділенні карти ознак базового шару на дві частини. Одна частина проходить через щільний блок (Dense Block) або серію згорткових перетворень, а інша частина передана транзитом і конкатенована з виходом щільного блока на наступній стадії переходу. Такий підхід допомагає досягти багатшого градієнтного потоку, оскільки градієнти від помилки поширюються різними шляхами, що запобігає їх дублюванню під час оновлення ваг. Реалізація такого підходу сприяє зменшенню обчислювальної складності моделі зі збереженням або навіть підвищенням точності детекції, що є критичним для роботи на пристроях з обмеженими ресурсами.

В архітектурі YOLO класичний модуль C3, що використаний у попередніх версіях, замінено на вдосконалений блок C2f. Основна відмінність полягає у структурі розгалуження потоків і кількості вихідних з'єднань, що дає змогу моделі захоплювати більш багату семантичну інформацію.

Процес обробки інформації всередині блока C2f можна формалізувати так: вхідний тензор X_{in} спочатку проходить через згортку Conv₁, яка зменшує кількість каналів, далі отриманий тензор розділяється на дві гілки:

$$Y_1, Y_2 = \text{Split}(\text{Conv}_1(X_{\text{in}})), \quad (8)$$

де X_{in} – вхідний тензор ознак, що надходить у блок C2f;

Conv₁ – згортка 1×1 , яка зменшує розмірність каналів вхідного тензора;

Split – операція розділення тензора на дві рівні частини вздовж каналного виміру;

Y_1 – частина потоку, що передана транзитом (skip connection) для збереження низькорівневих деталей;

Y_2 – частина потоку, що спрямована на глибоку обробку через серію Bottleneck-шарів.

Кожен блок Bottleneck складається з двох згортки 3×3 і використовує залишкові зв'язки (Residual connections), які відіграють головну роль у збереженні амплітуди градієнта з проходженням через глибокі шари, запобігаючи проблемі згасання градієнта (Vanishing Gradient Problem).

Унікальною особливістю C2f є те, що він агрегує не тільки вихід останнього Bottleneck-блока, а і проміжні виходи всіх внутрішніх блоків. Усі ці потоки об'єднані операцією конкатенації та проходять через фінальну згортку Conv₂ для відновлення вихідної розмірності каналів:

$$X_{\text{out}} = \text{Conv}_2(\text{Concat}(Y_1, Y_2, B_1(Y_2), B_2(B_1(Y_2)))) \quad (9)$$

ІНФОРМАЦІЙНО-КЕРУЮЧІ СИСТЕМИ НА ЗАЛІЗНИЧНОМУ ТРАНСПОРТІ

де X_{out} – вихідний тензор блока C2f;

$V_i(Y_2)$ – вихід i -го послідовного блока Bottleneck;

Concat – операція конкатенації (об'єднання) усіх проміжних потоків ознак, що збагачує семантичне подання;

Conv₂ – фінальна згортка 1×1 , що інтегрує об'єднані ознаки та відновлює необхідну кількість каналів.

Запропонована архітектура забезпечує більш ефективне злиття низькорівневих і високорівневих ознак, що підвищує здатність мережі розрізняти текстури та дрібні деталі об'єктів.

Завершальним елементом екстрактора ознак є модуль SPPF (Spatial Pyramid Pooling Fast), який призначений для розширення рецептивного поля мережі та агрегації контекстної інформації з різних масштабів. На відміну від класичного SPP, який використовує паралельні гілки субдискретизації з різними ядрами, SPPF реалізує послідовну каскадну схему, що є більш обчислювально ефективним рішенням.

Алгоритм роботи SPPF полягає в послідовному застосуванні операції максимізації (Max Pooling) із фіксованим розміром ядра 5×5 і кроком 1 (із використанням padding для збереження просторової розмірності). Нехай вхідний тензор модуля – F_0 . Тоді послідовність перетворень має вигляд

$$\begin{aligned} F_1 &= \text{MaxPool}_{5 \times 5}(F_0) \\ F_2 &= \text{MaxPool}_{5 \times 5}(F_1), \\ F_3 &= \text{MaxPool}_{5 \times 5}(F_2) \end{aligned} \quad (10)$$

де F_0 – вхідний тензор ознак, що надходить у модуль SPPF (вихід останнього блока C2f Backbone);

F_1, F_2, F_3 – послідовні тензори ознак, отримані після застосування операції Max Pooling;

$\text{MaxPool}_{5 \times 5}$ – операція вибору максимального значення з вікна 5×5 пікселів.

Оскільки послідовне виконання двох таких процедур субдискретизації математично еквівалентне охопленню рецептивного поля 9×9 , а трьох – 13×13 , запропонована структура уможливує мультимасштабний аналіз ознак без залучення фільтрів великої розмірності, які суттєво уповільнюють обчислення. Результуючий тензор модуля сформований об'єднанням (конкатенацією) початкового масиву даних із результатами всіх етапів обробки, після чого застосовано фінальну згортку 1×1 :

$$X_{SPPF} = \text{Conv}(\text{Concat}(F_0, F_1, F_2, F_3)), \quad (11)$$

де X_{SPPF} – вхідний тензор у модуль SPPF;

Concat – об'єднання виходів послідовних просторових ознак, що допомагає мережі «бачити» об'єкти різного масштабу одночасно;

Conv – згортковий шар, що зміщує агреговані ознаки.

Завдяки такій інтеграції мережа отримує здатність ефективно поєднувати локальні ознаки об'єкта з його глобальним контекстом, що є критично важливим для коректної класифікації об'єктів на складному фоні.

Модуль агрегації ознак FPN_{CA} у запропонованій моделі є модифікацією класичної схеми і структурно описана як

$$\text{FPN}_{CA} = \{\text{PANet}, \text{CA}\}, \quad (12)$$

де PANet (Path Aggregation Network) – мережа агрегації шляхів для об'єднання ознак різних масштабів;

CA (Coordinate Attention) – інтегрований блок координатної уваги, що забезпечує просторову селекцію.

У класичній архітектурі одностадійних детекторів (YOLOv5/v8/v11) модуль агрегації ознак (Neck) зазвичай реалізований на базі схеми PANet. Хоча цей підхід ефективно комбінує семантичну інформацію з глибоких шарів і деталізацію з поверхневих, він має суттєвий недолік для роботи зі складними сценами: відсутність явного механізму фокусування уваги. Стандартні згорткові операції обробляють усі пікселі в межах рецептивного поля з однаковим пріоритетом, що призводить до «забруднення» корисного сигналу фоновим шумом, особливо в умовах камуфляжу.

Спроби інтеграції класичних механізмів уваги, таких як SE (Squeeze-and-Excitation) або CBAM (Convolutional Block Attention Module), часто не дають бажаного приросту точності в задачах локалізації об'єктів. Основна причина полягає у використанні ними операції глобального усереднення GAP (Global Average Pooling) для стиснення просторової інформації в одновимірний вектор каналів.

Із застосуванням методу глобального усереднення до вхідного масиву ознак відбувається перетворення двовимірних карт активації в одновимірний вектор, де значення кожного каналу сформовано обчисленням середнього арифметичного всіх пікселів. Таке стиснення даних призводить до повної втрати інформації про просторову структуру зображення, оскільки нівельована прив'язка ознак до конкретних координат. Якщо для задач звичайної класифікації це прийнятно, оскільки головною метою є лише ідентифікація наявності об'єкта, то для задач детекції, де критично важливою є точна локалізація меж, такий підхід фактично знищує позиційну інформацію, знижуючи чутливість моделі до розташування цілі.

Для подолання цього обмеження в архітектурі FPN_{CA} інтегровано механізм CA, який дає змогу моделювати залежності між каналами, зберігаючи при цьому точну позиційну інформацію.

Головною ідеєю методу є декомпозиція (розкладання) процесу просторового кодування. Замість традиційного підходу, що передбачає миттєве згортання всієї двовимірної карти ознак у єдине число, алгоритм виконує дві паралельні операції агрегації вздовж координатних осей. Це допомагає окремо обробляти інформацію для вертикального та горизонтального напрямків. Отже, для вхідного тензора X накопичення ознак відбувається незалежно за висотою H і шириною W , а результат цієї трансформації для c -го каналу на висоті H визначено виразом

$$z_c^h(h) = \frac{1}{W} \sum_{0 \leq i < W} x_c(h, i), \quad (13)$$

де $z_c^h(h)$ – значення глобально-усередненої ознаки для c -го каналу на висоті H ;

$x_c(h, i)$ – значення пікселя вхідної карти ознак;

W – ширина карти ознак, вздовж якої відбувається усереднення.

Аналогічно результат агрегації для c -го каналу на ширині W визначено як

$$z_c^w(w) = \frac{1}{H} \sum_{0 \leq j < H} x_c(j, w), \quad (14)$$

де H – висота карти ознак.

У результаті виконання цих операцій сформовано два незалежні набори агрегованих ознак: один відповідає за вертикальну складову зображення, а інший за горизонтальну. Такий підхід дає модулю змогу одночасно враховувати глобальний контекст уздовж однієї просторової осі та зберігати точну інформацію про позицію об'єкта вздовж іншої. Надалі отримані дескриптори піддають процедурі кодування для моделювання взаємозв'язків між каналами, під час якої відбувається їхнє просторове перетворення та подальше об'єднання в єдину структуру для спільної обробки.

Сформований тензор поданий на вхід згорткового шару $1 \times 1(\text{Conv}_1)$, який зменшує кількість каналів відповідно до коефіцієнта редукції r (у реалізації використано $r = 32$), що дає змогу зменшити обчислювальну складність. До результату згортки застосовано нелінійну функцію активації $H_{\text{swish}}(\delta)$, яка забезпечує гладкість градієнтів:

$$f = \delta(\text{Conv}_1([z^h, z^w])), \quad (15)$$

де f – проміжний тензор ознак зі зменшеною розмірністю каналів;

$[z^h, z^w]$ – операція конкатенації векторів висоти і ширини;

Conv_1 – згортка 1×1 , що моделює взаємозв'язки між каналами та зменшує їхню кількість на коефіцієнт редукції r ;

δ – нелінійна функція активації (Hard Swish), що забезпечує кращу виразність ознак.

На наступному етапі проміжний тензор розділяється на два незалежні потоки даних, що відповідають вертикальному та горизонтальному просторовим вимірам. Після цього до кожного з отриманих масивів застосовано окрему операцію згортки, завданням якої є відновлення початкової глибини каналів до значення, що було на вході блока. Фінальні карти уваги генеровані через застосування сигмоїдальної функції активації σ :

$$g^h = \sigma(\text{Conv}_h(f^h)), \quad (16)$$

$$g^w = \sigma(\text{Conv}_w(f^w)),$$

де g^h, g^w – фінальні вектори ваг уваги для висоти і ширини;

f^h, f^w – розділені частини проміжного тензора f ;

$\text{Conv}_h, \text{Conv}_w$ – згорткові шари, що відновлюють початкову кількість каналів C ;

σ – сигмоїдальна функція активації, що перетворює значення в діапазон $[0, 1]$, інтерпретуючи їх як імовірність важливості ознаки.

Результуючий вихід блока SA обчислюють як поелементний добуток вхідного тензора X на отримані карти уваги. Карти уваги автоматично розтягуються до розмірності вхідного тензора:

$$Y_c(i, j) = x_c(i, j) \times g_c^h(i) \times g_c^w(j), \quad (17)$$

де Y – вихідний тензор модуля SA;

x – вхідний тензор ознак;

g^h, g^w – вектори уваги, які діють як просторовий фільтр, підсилюючи сигнал у зонах розташування цільових об'єктів і пригнічуючи фоновий шум.

Фінальна формула (17) демонструє суть методу: значення кожного пікселя $x_c(i, j)$ модульована двома коефіцієнтами: $g_c^h(i)$ визначає важливість рядка (i) для каналу (c), а $g_c^w(j)$ – важливість стовпця (j). Отже, нейронна мережа отримує можливість адаптивно підсилити сигнал у зонах, де ймовірно знаходиться цільовий об'єкт (танки, бронетехніка) і пригнічувати сигнал у зонах фону (небо, трава), що значно підвищує відношення сигнал/шум перед подаванням даних на детекторну частину.

Завершальним етапом обробки інформації в нейромережеві архітектурі є функціонування модуля детекторної голови (DH). Концептуально архітектуру цього модуля можна подати як композицію трьох структурних принципів:

$$DH = \{\text{Decoupled}, \text{AnchorFree}, \text{DFL}\}, \quad (18)$$

де Decoupled – архітектура з розв'язаними гілками класифікації та регресії для усунення конфлікту ознак;

AnchorFree – без'якірний метод передбачення координат, що спрощує навчання;

DFL (Distribution Focal Loss) – механізм фокальних втрат розподілу для підвищення точності локалізації.

У розробленій моделі першочергово імплементовано концепцію «розв'язаної голови» Decoupled, яка розв'язує фундаментальну проблему конфлікту ознак (Feature Misalignment), притаманну класичним одностадійним детекторам. Суть проблеми полягає в тому, що задачі класифікації та локалізації потребують від нейронної мережі фокусування на різних типах інформації: для коректного визначення класу об'єкта критично важливими є інваріантні семантичні ознаки (текстура, форма), тоді як для точної регресії координат необхідна детальна просторова інформація про межі та градієнти контурів.

Архітектурно принцип Decoupled Head реалізовано через розділення вхідного потоку даних на дві незалежні паралельні гілки обробки. Формально структуру цього модуля для кожного рівня масштабу піраміди ознак P_i можна подати як композицію функцій

$$P_i = \{\phi_{\text{cls}}(\text{Conv}(P_i)), \phi_{\text{reg}}(\text{Conv}(P_i))\}, \quad (19)$$

де Conv – згортковий шар для зменшення розмірності каналів;

ϕ_{cls} – послідовність згорткових операцій гілки класифікації;

ϕ_{reg} – послідовність операцій гілки регресії.

Такий підхід дає змогу формувати специфічні для кожної підзадачі карти активації, мінімізуючи взаємний негативний вплив градієнтів під час зворотного поширення помилки.

Функціонування гілки класифікації спрямоване на передбачення ймовірного розподілу належності виявленого об'єкта до одного з N цільових класів. Вихідний тензор цієї гілки проходить через сигмоїдальну функцію активації, що нормує значення в діапазон $[0, 1]$. Математично вихідні значення для кожного якоря просторової сітки визначають як умовну ймовірність

$$P = \sigma(W_{\text{cls}} \cdot F_{\text{cls}} + b_{\text{cls}}), \quad (20)$$

де σ – сигмоїдальна функція;

W_{cls} і b_{cls} – навчальні параметри згорткового шару класифікації;

F_{cls} – вхідні ознаки гілки.

В умовах військового застосування, де об'єкти можуть мати візуальну подібність (наприклад різні модифікації танків Т-72 і Т-90), така спеціалізація гілки допомагає мережі краще вивчати ознаки, що відрізняються.

Паралельно функціонує гілка регресії, задачею якої є передбачення геометричних параметрів обмежувальної рамки. Важливою еволюційною зміною в запропонованій моделі є відмова від використання фіксованих якорів (Anchor Boxes) на користь без'якірного підходу (Anchor-free). Замість прогнозування зміщення відносно попередньо заданих шаблонів, модель безпосередньо передбачає відстані від центра поточної чарунки сітки (c_x, c_y) до чотирьох сторін обмежувальної рамки: лівої l , верхньої t , правої r і нижньої b . Вектор виходу регресії

$$(B) = \{l, t, r, b\} \rightarrow \begin{cases} x_{\min} = c_x - l \\ y_{\min} = c_y - t \\ x_{\max} = c_x + r \\ y_{\max} = c_y + b \end{cases}, \quad (21)$$

де B – вектор передбачених геометричних параметрів рамки;

l, t, r, b – відстані від центра поточної чарунки сітки до лівої, верхньої, правої та нижньої меж об'єкта відповідно.

Для підвищення точності локалізації в умовах невизначеності (розмиття, часткове перекриття) у гілці регресії застосовано підхід DFL. Замість прогнозування одного детермінованого значення відстані мережа передбачає розподіл імовірностей значень координат. Математичне очікування оцінки координати розраховують інтегральним методом (або дискретною сумою) за розподілом імовірностей $P(y_i)$:

$$\tilde{y} = \sum_{i=0}^n P(y_i) \cdot y_i, \quad (22)$$

де \tilde{y} – фінальне оцінене значення координати межі рамки;

$P(y_i)$ – імовірність того, що істинне значення координати знаходиться в точці y_i . І слід розуміти, що $\sum P(y_i) = 1$;

y_i – дискретні значення координат у вікні пошуку.

Така методологія дає змогу враховувати неоднозначність меж об'єкта, що є критичним для обробки відеопотоку з безпілотників, де чіткість контурів часто знижена через вібрації або атмосферні явища. Використання DFL разом із без'якірним підходом значно спрощує архітектуру модуля детекції, зменшує кількість гіперпараметрів і знижує

обчислювальне навантаження на етапі декодування передбачень, роблячи систему більш адаптивною до об'єктів із нестандартним співвідношенням сторін.

Компонент DFL є специфічним для Anchor-free архітектур, які передбачають відстані до сторін рамки. У реальних умовах, особливо зйомка з БПЛА, межі об'єктів часто є розмитими або перекритими, що робить точне визначення координат неоднозначним. DFL допомагає моделювати цю невизначеність, розглядаючи координату не як дискретне число, а як розподіл імовірностей навколо істинного значення. Функція втрат DFL спрямована на те, щоб сконцентрувати (звужити) цей розподіл навколо правильного значення, підвищуючи впевненість мережі в локалізації чітких меж і дозволяючи більшу дисперсію для розмитих меж. Застосування цього підходу значно підвищує стійкість детектора до візуальних спотворень і низької роздільної здатності вхідного зображення.

Процес навчання нейронної мережі базований на мінімізації цільової функції, яка кількісно оцінює розбіжність між передбаченими значеннями та істинною розміткою. У розробленій моделі реалізовано механізм обчислення функції втрат LFn, що являє собою зважену лінійну комбінацію трьох компонентів, кожен із яких відповідає за оптимізацію окремого аспекту детекції. Формально загальна функція втрат описана рівнянням

$$LFn = \lambda_{\text{box}} L_{\text{box}} + \lambda_{\text{cls}} L_{\text{cls}} + \lambda_{\text{dfl}} L_{\text{dfl}}, \quad (23)$$

де L_{box} – втрати регресії координат рамки;

L_{cls} – втрати класифікації об'єкта;

L_{dfl} – фокальні втрати розподілу;

L_{box} , L_{cls} , L_{dfl} – гіперпараметри, що регулюють внесок кожного компонента у загальний градієнт, забезпечуючи баланс між точністю локалізації та розпізнавання.

Для оцінювання якості передбачення геометричних параметрів обмежувальної рамки використовують метрику CIoU (Complete Intersection over Union). На відміну від класичної IoU, яка враховує лише площу перекриття, або DIoU, що додає відстань між центрами, CIoU враховує три критично важливі геометричні фактори: площу перекриття, евклідову відстань між центрами рамок та узгодженість співвідношення сторін. Математично функція втрат визначена виразом

$$L_{\text{box}} = 1 - \text{IoU} + \frac{\rho^2(b, b^{\text{gt}})}{c^2} + \alpha v, \quad (24)$$

де IoU – коефіцієнт перекриття передбаченої (b) та істинної (b^{gt}) рамок;

ρ – евклідова відстань між центрами рамок;

c – довжина діагоналі найменшого прямокутника, що охоплює обидві рамки;

α – ваговий коефіцієнт;

v – параметр, що вимірює подібність відношення сторін $\frac{W}{H}$.

Використання CIoU забезпечує більш стабільну та швидку збіжність форми рамки, запобігаючи осциляціям градієнта на фінальних етапах навчання.

Для навчання гілки класифікації застосовують функцію Varifocal Loss (VFL) або модифіковану бінарну крос-ентропію. Основною проблемою в задачах детекції є екстремальний дисбаланс класів: кількість якорів, що містять фонове зображення, на кілька порядків перевищує кількість якорів з об'єктами. VFL розв'язує цю проблему асиметричним зважуванням прикладів:

$$VFL(p, q) = \begin{cases} -q(q \log(p) + (1-q) \log(1-p)) & q > 0 \\ -\alpha p^{\gamma \log(1-p)}, q = 0 \end{cases} \quad (25)$$

де p – передбачена ймовірність класу;

q – цільова оцінка якості для позитивних прикладів (або 0 для негативних);

γ, α – параметри фокусування, що зменшують внесок простих негативних прикладів (фону) у функцію втрат.

Для позитивних прикладів ($q > 0$) втрата масштабована відповідно до якості локалізації q , що змушує мережу приділяти більше уваги високоякісним детекціям. Для негативних прикладів ($q = 0$) застосовують фокусуючий параметр, який знижує вагу простих фонових прикладів, запобігаючи домінуванню «легких» негативних зразків у функції втрат.

Для забезпечення практичного використання розробленої нейромережевої моделі в умовах реального часу створено програмну підсистему інференсу (InfE), яка відповідає за розгортання моделі та її взаємодію з джерелами відеосигналу. На етапі експлуатації основними вимогами щодо системи є мінімізація латентності обробки та забезпечення стабільності відеопотоку, чого досягають завдяки модульній об'єктно-орієнтованій архітектурі. Формально підсистема описана коротцем компонентів

$$\text{InfE} = \{ \text{Grabber}, \text{Converter}, \text{DeviceMgr}, \text{FPS} \} \quad (26)$$

де Grabber – модуль захоплення кадрів;

Converter – блок попередньої обробки зображень;

DeviceMgr – менеджер обчислювальних ресурсів;

FPS_{lim} – механізм стабілізації кадрової частоти.

Центральним елементом підсистеми є клас Grabber, який реалізує патерн проектування

ІНФОРМАЦІЙНО-КЕРУЮЧІ СИСТЕМИ НА ЗАЛІЗНИЧНОМУ ТРАНСПОРТІ

«Адаптер», створюючи рівень абстракції над низькорівневими інтерфейсами бібліотеки OpenCV. Його основне завдання полягає в інкапсуляції логіки ініціалізації та конфігурації пристроїв захоплення. Клас забезпечує гнучке перемикання між різнорідними джерелами відеосигналу, підтримуючи роботу як із фізичними сенсорами, так і віртуальними потоками, наприклад OBS Virtual Camera. Ця процедура дає змогу динамічно налаштовувати роздільну здатність вхідного потоку для узгодження з параметрами вхідного шару нейромережі, забезпечуючи отримання матриці зображення.

Критично важливим етапом підготовки даних є узгодження колірних моделей, оскільки стандартні драйвери відеопристроїв оперують зображеннями у форматі BGR, а вхідний шар нейронної мережі налаштований на сприйняття простору RGB. Для розв'язання цієї проблеми компонент Converter виконує обов'язкову трансформацію колірного простору вхідного кадру. Математично ця операція описана як перетворення тензора:

$$I_{RGB} = T_{BGR \rightarrow RGB} (I_{raw}), \quad (27)$$

де I_{RGB} – тензор зображення у форматі, необхідному для нейромережі;

I_{raw} – «сире» зображення, отримане з камери (зазвичай BGR);

T – оператор перестановки каналів масиву.

Паралельно компонент DeviceMgr реалізує механізм автоматичного вибору обчислювального пристрою. Перед завантаженням моделі перевіряють наявність апаратного прискорення:

$$\text{DeviceMgr} = \begin{cases} \text{CUDA, якщо } \exists \text{ GPU} \\ \text{CPU, інакше} \end{cases}, \quad (28)$$

де CPU (Central Processing Unit) – ідентифікатор режиму виконання обчислень на центральному процесорі;

GPU (Graphics Processing Unit) – логічна умова наявності в системі сумісного графічного прискорювача з підтримкою драйверів CUDA.

У разі виявлення підтримки технології CUDA модель і вхідні тензори автоматично переміщуються у відеопам'ять, що дає змогу використовувати паралелізм графічних ядер для виконання матричних операцій і суттєво пришвидшує процес детекції.

Алгоритм основного циклу обробки побудовано за конвеєрним принципом. На кожній ітерації отриманий кадр передається методу предикції, який виконує пряме проходження нейронної мережі. Результати детекції візуалізують накладанням графічних примітивів. Для забезпечення комфортного сприйняття відеопотоку та синхронізації з частотою оновлення монітора впроваджено компонент FPS_{lim} , який реалізує адаптивний алгоритм

стабілізації, що розраховує необхідний час затримки t_{wait} для кожного кадру з метою дотримання цільової частоти FPS_{lim} :

$$t_{wait} = \max \left(0, \frac{1}{FPS_{target}} - (t_{end} - t_{start}) \right), \quad (29)$$

де t_{wait} – розрахований час затримки перед обробкою наступного кадру;

FPS_{target} – бажана частота кадрів;

t_{end}, t_{start} – системний час завершення та початку циклу обробки поточного кадру відповідно.

Якщо розрахована затримка є додатною, система призупиняє виконання процесу, що дає змогу утримувати стабільну частоту кадрів, запобігаючи розсинхронізації відеоряду та надмірному навантаженню на процесор у моменти простою.

Результати та їх обговорення

Експериментально перевіряли ефективність запропонованої моделі ODS через порівняльний аналіз із базовою архітектурою YOLOv11n на спеціалізованому наборі даних військової техніки. Для забезпечення репрезентативності результатів валідаційну вибірку було розширено до 1318 зображень, що охоплюють 33 класи об'єктів у різних умовах спостереження (день, ніч, складні погодні умови, маскування). Оцінювали якість детекції за метриками mAP50 (середня точність за порогового значення перекриття 50 %) і mAP50-95 (усереднена точність у діапазоні порогів від 50 до 95 %).

На першому етапі досліджень було протестовано базову модель YOLOv11n, яку використовували як точку відліку (baseline). Після 50 епох навчання модель продемонструвала показник mAP50 на рівні 0.603 і mAP50-95 на рівні 0.447. Аналіз помилок показав, що стандартна архітектура ефективно справляється з великими та контрастними об'єктами, проте демонструє зниження чутливості з детекцією малорозмірних цілей та об'єктів зі складним камуфляжем, що підтверджує теоретичне припущення про недостатність локальних рецептивних полів для таких задач.

На другому етапі було досліджено модель із глибокою інтеграцією механізмів уваги (Deep SVAM), де блоки уваги додавали після кожного основного вузла екстрактора ознак. Результати цього експерименту виявилися показовими з точки зору обмежень трансферного навчання. Модель продемонструвала падіння метрики mAP50-95 до рівня 0.246. Такий результат пояснюють явищем «катастрофічного забування» (catastrophic forgetting) і руйнуванням структури попередньо навчених ваг. Масове впровадження нових ініціалізованих шарів призвело до значних змін у розподілі градієнтів, через що 50 епох виявилось недостатньо для відновлення функціональності фільтрів і їхньої адаптації до нових умов. Для коректного навчання такої «важкої»

ІНФОРМАЦІЙНО-КЕРУЮЧІ СИСТЕМИ НА ЗАЛІЗНИЧНОМУ ТРАНСПОРТІ

архітектури необхідна значно більша кількість ітерацій навчання або використання більшого обсягу навчальних даних для стабілізації ваг.

На третьому етапі було реалізовано оптимізовану архітектуру, що отримала умовну назву Lite CA (Lite Coordinate Attention), для якої характерна стратегія селективної інтеграції: замість насичення кожного блока мережі додатковими обчислювальними модулями механізм уваги було впроваджено точково – виключно перед фінальним шаром пірамідальної агрегації. Такий підхід допоміг зберегти семантичну цілісність ознак, сформованих Vaskbone-частиною, і водночас додати контекстну інформацію. Ця модель продемонструвала найкращий результат: показник mAP50 зріс до 0.651, що на 8 % перевищує базовий рівень. При цьому, незважаючи на незначне зниження метрики строгої локалізації mAP50-95 (0.437), модель показала суттєво вищу здатність до виявлення об'єктів (Recall), що є пріоритетним для військових систем, де пропуск цілі є критичною помилкою.

Для підтвердження коректності процесу навчання та оцінювання динаміки збіжності моделі було проаналізовано зміни основних метрик протягом усіх епох (рис. 1). Графічні залежності демонструють, що функція втрат локалізації (Box Loss) і класифікації стрімко знижується на початкових етапах і виходить на сталий рівень, що свідчить про успішну адаптацію

вагових коефіцієнтів мережі. Особливу увагу слід звернути на графік середньої точності (mAP@0.5). Спостерігають стабільне зростання показника без суттєвих коливань, що підтверджує гіпотезу про позитивний вплив інтегрованого механізму уваги на стабільність градієнтів. Високі значення повноти виявлення (Recall), зафіксовані на завершальних етапах, вказують на здатність системи ефективно виявляти об'єкти навіть за умов низької контрастності, мінімізуючи кількість пропусків цілей.

Якісний аналіз ефективності методу наведено на рис. 2, де продемонстровано результат обробки тестового кадру відеопотоку. Як видно із зображення, детектор успішно локалізує об'єкт військової техніки, формуючи обмежувальну рамку з високим ступенем довіри (Confidence Score).

Критично важливим є те, що, незважаючи на наявність природних перешкод і складний фон (рослинність, тіні), межі передбаченої рамки максимально точно відповідають реальним контурам об'єкта. Такої точності позиціонування досягають завдяки роботі модуля Coordinate Attention, який допоміг зберегти просторову інформацію про межі об'єкта після багаторазових операцій зменшення розмірності. Це підтверджує практичну придатність моделі для використання в системах автономного спостереження та розвідки.

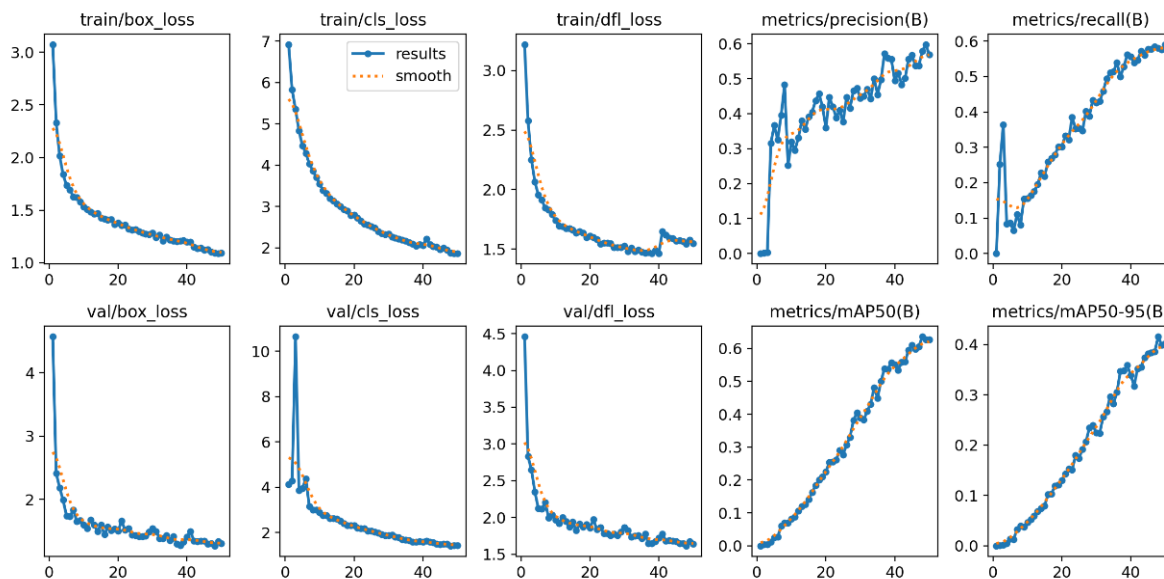


Рис. 1. Динаміка зміни функції втрат і метрик точності (mAP, Recall) під час навчання модифікованої моделі YOLO

На рис. 3 наведено приклад роботи модифікованого детектора на тестовому зображенні, що демонструє результати інференсу в реальних умовах. Як видно з результатів візуалізації,

неймережа успішно локалізувала об'єкт інтересу, сформувавши обмежувальну рамку з високим ступенем довіри (Confidence Score).

ІНФОРМАЦІЙНО-КЕРУЮЧІ СИСТЕМИ НА ЗАЛІЗНИЧНОМУ ТРАНСПОРТІ



Рис. 2. Результати детекції об'єкта бронетехніки в умовах складного фону з відображенням ступеня довіри алгоритму

11n-cbam summary (fused): 79 layers, 3,018,958 parameters, 0 gradients, 8.1 GFLOPs							
Class	Images	Instances	Box(P)	R	mAP50	mAP50-95)	
all	1378	1810	0.633	0.57	0.651	0.437	
T-72A	181	234	0.733	0.637	0.732	0.423	
T-64	52	52	0.71	0.788	0.807	0.535	
T-80	66	112	0.312	0.652	0.407	0.227	
T-90	24	46	0.491	0.63	0.617	0.38	
Leopard 1	24	34	0.485	0.294	0.397	0.234	
Leopard 2	129	203	0.634	0.701	0.742	0.444	
M1A2	105	159	0.605	0.623	0.685	0.435	
XM1	13	13	0.623	0.462	0.596	0.409	
Chalanger	64	80	0.483	0.4	0.441	0.264	
BMP1	31	35	0.64	0.571	0.591	0.425	
BMP2	65	68	0.894	0.809	0.897	0.617	
BMD3	33	33	0.448	0.727	0.656	0.471	
Wolfpack (M1128)	52	52	0.327	0.962	0.92	0.695	
AMX-30	13	13	0.47	0.769	0.752	0.468	
Mercava	33	56	0.584	0.304	0.37	0.23	
Marder 1A2	31	31	0.298	0.452	0.416	0.307	
Leclerc	49	58	0.699	0.586	0.697	0.477	
Bradley M2	82	88	0.735	0.92	0.93	0.67	
Ka-50	7	7	1	0	0.384	0.173	
2S38	68	68	0.781	0.926	0.937	0.671	
Roicat	46	46	0.547	0.196	0.481	0.345	
Type 87	55	55	0.384	0.964	0.843	0.654	
WMA	54	55	0.736	0.636	0.748	0.553	
M60	13	13	1	0.226	0.666	0.453	
Centurion	13	13	1	0.203	0.503	0.376	
UH-1H	9	9	1	0	0.444	0.221	
U-SH 405	44	44	0.517	0.864	0.815	0.612	
Centaora	50	50	0.48	0.7	0.618	0.467	
Vextra	13	13	0.609	0.923	0.885	0.696	
TAM 2	31	31	0.456	0.645	0.597	0.443	
BUC-M3	10	10	0.627	0.9	0.832	0.521	
Top-m1	10	10	0.581	0.281	0.46	0.267	
AN-1H	19	19	1	0.0537	0.626	0.267	

Рис. 3. Результат детекції бронетехніки (візуалізація обмежувальної рамки та розрахованого ступеня довіри класифікатора)

Слід відзначити високу щільність прилягання рамки до контурів об'єкта, що свідчить про коректну роботу регресійної частини моделі та мінімізацію похибки локалізації. Незважаючи на наявність візуальних перешкод і низький контраст між об'єктом і фоном (ефект камуфляжу), інтегрований механізм

уваги допоміг виділити значущі ознаки цілі, відфільтрувавши інформаційний шум навколишнього середовища. Це підтверджує здатність розробленої архітектури ефективно функціонувати в умовах, наближених до бойових (таблиця).

Порівняння підходів навчання моделей

Архітектура моделі	mAP@0.5	mAP@0.5:0.95	Кількість параметрів (М)	Обчислювальна складність (GFLOPs)	Примітка
YOLOv11n (baseline)	0.603	0.446	2.6	6.3	базова модель без модифікацій
YOLOv11n + Deep CBAM	0.404	0.246	3.5	8.7	важка інтеграція (чотири блоки), перенавчання не вдалося
YOLOv11n + Lite CA	0.651	0.437	3.0	8.1	запропонована модель (один блок CA)

Окремо потрібно зазначити вплив структури датасету на отримані результати. Аналіз покласової точності виявив диспропорцію в результатах: для масових класів (наприклад Bradley M2, 2S38) точність сягала 0.93-0.94, тоді як для рідкісних зразків техніки показники були нижчими. Отримані експериментальні дані свідчать про те, що наявний дисбаланс класів у навчальній вибірці створює додаткові труднощі для навчання, які частково компенсовано впровадженими механізмами уваги, але для подальшого підвищення точності потребують застосування синтетичних даних або розширення датасету.

Висновки

У роботі вирішено науково-практичне завдання підвищення точності автоматизованої детекції військових об'єктів у відеопотоці через удосконалення нейромережевої архітектури.

Аналіз архітектурних рішень показав, що пряма імплементація складних механізмів уваги (важка інтеграція CBAM) у попередньо навчені мережі є неефективною в умовах обмеженого часу навчання (50 епох). Встановлено, що це призводить до дестабілізації ваг моделі та потребує значно більших обчислювальних ресурсів для збіжності, що робить такий підхід недоцільним для швидкого розгортання.

Додатково обґрунтовано, що класичні методи зменшення просторової розмірності (глобальне усереднення) призводять до втрати критично важливої позиційної інформації. Натомість використаний механізм координатної уваги забезпечує декомпозицію процесу просторового кодування, що допомагає зберігати точні координати меж об'єкта навіть із проходженням сигналу через глибокі шари мережі. Це стало головним фактором для покращення локалізації.

Запропонована стратегія точкової інтеграції модуля CA (Lite-версія) допомогла досягти компромісу між складністю моделі та її точністю. Експериментально підтверджено приріст метрики

mAP50 до 0.651, що свідчить про підвищення ймовірності виявлення замаскованих і малорозмірних цілей порівняно з базовою архітектурою YOLOv11.

Особливу цінність для прикладної сфери становить зафіксоване зростання повноти виявлення, що свідчить про здатність системи мінімізувати кількість помилок другого роду (пропусків цілі), що є критичним показником для військових задач. Модель продемонструвала високу стійкість до візуальних перешкод, ефективно виділяючи об'єкти на складному фоні в умовах природного маскування.

Також підтверджено ефективність структурної модифікації модуля детекції (Decoupled Head). Розділення потоків обробки для задач класифікації та регресії координат допомогло пришвидшити збіжність алгоритму та усунути конфлікт ознак, що позитивно вплинуло на точність позиціонування обмежувальних рамок.

Розроблена програмна підсистема інференсу забезпечила стабільну роботу моделі в режимі реального часу, реалізуючи адаптивну обробку відеопотоку з різних джерел. Виявлено, що стримуючим фактором для подальшого зростання точності є дисбаланс класів у навчальному наборі даних, що визначає напрям подальших досліджень у площині генерації синтетичних навчальних прикладів. Отримані результати дають змогу рекомендувати розроблену модель для використання в системах ситуаційної обізнаності та автоматизованого цілевказання.

Список використаних джерел

1. Terven J., Cordova-Esparza D., Romero-Gonzalez J. A Comprehensive Review of YOLO Architectures in Computer Vision: From YOLOv1 to YOLOv8 and YOLO-NAS. *Machine Learning and Knowledge Extraction*. 2023. Vol. 5, Iss. 4. P. 1680-1716. URL: <https://doi.org/10.3390/make5040083>.
2. Цюник Б. С., Муляревич О. В. Оцінка продуктивності та оптимізація моделей нейронних мереж YOLOv8 для розпізнавання цілей. *Комп'ютерні системи та мережі*. 2024. Т. 6, № 2. С. 242-251. URL: <https://doi.org/10.23939/csn2024.02.242>.

3. Назаркевич М., Олексів Н. Система розпізнавання об'єктів на основі моделі YOLO. *Український журнал інформаційних технологій*. 2024. Т. 6, № 1. С. 120-126. URL: <https://doi.org/10.23939/ujit2024.01.120>.
4. Сліпачук Л., Сліпачук В., Поліщук Т. Побудова системи ідентифікації рухомих об'єктів. *Кібербезпека: освіта, наука, техніка*. 2024. Т. 4, № 24. С. 410-433. URL: <https://doi.org/10.28925/2663-4023.2024.25.410433>.
5. Слюсар В. І. Застосування нейромережових технологій для виявлення підводних боєприпасів. *Вісті вищих навчальних закладів. Радіоелектроніка*. 2023. Т. 66, № 3. С. 766-777. URL: <https://doi.org/10.20535/S0021347023030020>.
6. Zhao Y., Xu S., Wei J. DETRs Beat YOLOs on Real-time Object Detection. *Proceedings of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*. 2024. P. 16965-16974. URL: <https://doi.org/10.1109/CVPR52733.2024.01605>.
7. Галаган Н. В., Борисенко І. І., Яковець В. П., Бойко О. В. Концептуальна модель системи управління розпізнавання образів із застосуванням ШІ. *Телекомунікаційні та інформаційні технології*. 2025. № 3 (88). URL: <https://doi.org/10.31673/2412-4338.2025.038709>.
5. Sliusar, V. I. (2023). Zastosuvannia neiromerezhevykh tekhnolohii dlia vyivlennia pidvodnykh boieprypasiv [Application of neural network technologies for the detection of underwater ammunition]. *Visti vyshchyykh navchalnykh zakladiv. Radioelektronika [Radioelectronics and Communications Systems]*, 66(3), 766–777. <https://doi.org/10.20535/S0021347023030020>
6. Zhao, Y., Xu, S., & Wei, J. (2024). DETRs beat YOLOs on real-time object detection. In *Proceedings of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)* (pp. 16965–16974). <https://doi.org/10.1109/CVPR52733.2024.01605>
7. Halahan, N. V., Borysenko, I. I., Yakovets, V. P., & Boiko, O. V. (2025). Kontseptualna model systemy upravlinnia rozpoznavannia obraziv iz zastosuvanniam Shi [Conceptual model of a pattern recognition control system using AI]. *Telekomunikatsiini ta informatsiini tekhnolohii [Telecommunication and Information Technologies]*, (3(88)). <https://doi.org/10.31673/2412-4338.2025.038709>

References

1. Terven, J., Cordova-Esparza, D., & Romero-Gonzalez, J. (2023). A comprehensive review of YOLO architectures in computer vision: From YOLOv1 to YOLOv8 and YOLO-NAS. *Machine Learning and Knowledge Extraction*, 5(4), 1680–1716. <https://doi.org/10.3390/make5040083>
2. Tsiunyk, B. S., & Muliarevych, O. V. (2024). Otsinka produktyvnosti ta optymizatsiia modelei neuronnykh merezh YOLOv8 dlia rozpoznavannia tsilei [Performance evaluation and optimization of YOLOv8 neural network models for target recognition]. *Kompiuterni systemy ta merezhi [Computer Systems and Networks]*, 6(2), 242–251. <https://doi.org/10.23939/csn2024.02.242>
3. Nazarkevych, M., & Oleksiv, N. (2024). Systema rozpoznavannia ob'ektiv na osnovi modeli YOLO [Object recognition system based on the YOLO model]. *Ukrainskyi zhurnal informatsiinykh tekhnolohii [Ukrainian Journal of Information Technologies]*, 6(1), 120–126. <https://doi.org/10.23939/ujit2024.01.120>
4. Slipachuk, L., Slipachuk, V., & Polishchuk, T. (2024). Pobudova systemy identyfikatsii rukhomykh ob'ektiv [Building a moving object identification system]. *Kiberbezpeka: osvita, nauka, tekhnika [Cybersecurity: Education, Science, Technique]*, 4(24), 410–433. <https://doi.org/10.28925/2663-4023.2024.25.410433>

T. Filimonchuk, Y. Koltun, M. Maslov Adaptive Model for Equipment Recognition with Attention Mechanisms Based on YOLOv11

Abstract. Background. The relevance of the study is driven by the need to improve the efficiency of computer vision systems in modern warfare, where the rapid development of unmanned aerial vehicles and reconnaissance equipment requires reliable tools for the automated detection of military hardware in real time. Despite their high processing speed, existing detectors demonstrate a decrease in accuracy when dealing with small, camouflaged objects or in complex background environments due to the loss of spatial information during convolutional operations. Therefore, improving the neural network architecture model by integrating attention mechanisms and optimizing computational processes is of particular importance. **Object of the study** is the process of automated detection and localization of military objects in an optical video stream. **Subject of the study** encompasses methods for the structural modification of the YOLO convolutional neural network architecture using coordinate attention mechanisms and decoupled detection modules. **Results.** The paper proposes and implements a modified neural network architecture model, the key feature of which is the pinpoint integration of a lightweight coordinate attention module (Lite CA) before the feature pyramid aggregation layer. This allowed for the decomposition of the spatial encoding process, preserving precise positional information that is typically lost during standard global averaging. The introduction of the «detection head»

component into the model ensured the independent processing of classification and coordinate regression tasks. It was experimentally confirmed that the adaptive model achieves a mean average precision (mAP@0.5) of 0.651, which is 8 % higher than the baseline, and demonstrates a significant increase in recall.

Conclusions. The proposed approach provides an effective balance between localization accuracy and computational complexity, guaranteeing the detector's high robustness against visual interference and camouflage effects. The developed model is recommended for implementation in autonomous situational awareness and target designation systems, allowing for the minimization of target omission errors in combat conditions.

Keywords: YOLOv11, CBAM, attention mechanism, object detection, computer vision, transfer learning, convolutional neural networks, Python, PyTorch.

Стаття надійшла 11.03.26

Стаття прийнята до друку після рецензування 20.04.26

Стаття опублікована (оприлюднена) 29.05.26

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

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

Колтун Юрій Миколайович, кандидат технічних наук, доцент кафедри «Інформаційно-мережної інженерії» Харківський національний університет радіоелектроніки, Харків, Україна, E-mail: yurii.koltun@nure.ua, ORCID: 0000-0003-2680-9978

Маслов Микола Костянтинович, магістрант, Харківський національний університет радіоелектроніки, Харків, Україна, E-mail: mykola.maslov@nure.ua, ORCID: 0009-0000-1653-3408

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

Yuriy Koltun, PhD, Associate Professor of the Department of Information and Network Engineering, Kharkiv National University of Radio Electronics, Kharkiv, Ukraine, E-mail, e-mail: yurii.koltun@nure.ua, ORCID: 0000-0003-2680-9978

Maslov Mykola, master's student, Kharkiv National University of Radio Electronics, Kharkiv, Ukraine, E-mail: mykola.maslov@nure.ua, ORCID: 0009-0000-1653-3408

Assoc. Prof. J. Dižo,
 Ing. M. Bučko,
 Assoc. Prof. M. Blatnický,
 Ing. P. Slušňák

DYNAMIC ANALYSIS OF A SUBURBAN RAILWAY VEHICLE

Simulation modelling and analyses are widely used in a railway vehicle design. They allow to find the most favourable parameters of wagons in order to achieve high level of ride comfort and running safety. The presented research is focused creation of an suburban rail vehicle, i.e. a passenger wagon. The simulation model was used for analysis of dynamic properties for two running cases, namely to find a critical running speed and the derailment quotient in a curve. The derailment quotient is a factor of running safety of the solved vehicle.

Keywords: rail vehicle, suspension system, multibody simulations, dynamics.

Introduction

Dynamic analyses play a key role in the development and optimization of railway vehicle. There are various ways to perform the analysis. Currently used programs for computer simulations of railway vehicle operation provide a significant advantage in terms of time and financial complexity for optimization purposes compared to testing vehicles in real conditions on measuring equipment [1, 2].

One of such commercial multibody programs is Simpack, which is used at the research authors' workplace. The basic simulation calculations performed in these programs include eigenvalue analysis, simulation of driving on a straight line with investigation of vehicle running stability, passenger comfort when driving on worn track, and especially simulation of driving in a curve and investigation of safety against derailment and loading of the track and vehicle, etc.

The aim of the research is to perform dynamic analyses of a suburban railway vehicle with electric traction. The prescribed minor structural changes to the vehicle and their impact on the simulation results are investigated. The research contains theoretical knowledge about simulation calculations. The next part discusses the objectives of the research. The work is focused on the study of dynamic behaviour of vehicles using the Simpack multibody program and the influence of vehicle design on it, as well as for the summary of information and its adaptation.

The need for dynamic analyses of the behaviour of railway vehicle is influenced by their mechanical structure. Railway vehicle represents large dynamic systems with a large number of degrees of freedom, i.e. in principle, each mechanical body has six degrees of freedom (3 in the translational sense and 3 in the rotational sense). Furthermore, there are complex force elements and also a complex problem of wheel-rail contact. The number of degrees of freedom is limited only by mechanical connections. The behaviour of such systems is therefore complicated and unclear.

Thus, such complex systems cannot be solved analytically with a meaningful expenditure of effort, time and financial costs [3, 4].

The basic areas of practical use of dynamic calculations in the field of railway vehicle include the conceptual development of new railway vehicle, calculations for the purpose of dimensioning, verification calculations, analysis of dynamic forces and movements, which are used as inputs for other analyses, e.g. strength analyses of structures, support for driving tests, comparison of measurement and calculation results, thereby verifying the correctness and authenticity of the model, solving problems with vehicles in operation, as well as measurement, evaluation and design of new wheel and rail profiles.

The reasons for the use and application of simulation programs in practice could be briefly summarized as follows. Simulation calculations allow to shorten the time and reduce the costs required for the development of new railway vehicle, to reduce the number of tests runs of railway vehicle when experimental measurements are performed, to expand the possibilities for optimizing railway vehicle parameters, and also to provide information on the loading of individual railway vehicles components.

Analysis of recent studies and publications.

Recently, scientists and scholars took their effort to analyse running properties of rail vehicles by means of simulation computations at many universities and institutions. A brief overview of the latest available studies and publications are provided in this section.

The study performed by Sugathapala et al. [5] is focused on comprehensively investigation of the influence of wheel and rail wear on both derailment coefficients and critical derailment limits when a railway vehicle is running on a curved track. The authors team revealed that existing assessment methods have certain deficiencies.

They either fail to account for the critical derailment limits of rely on conservative criteria known as the Nadal and Weinstock criterion.

© DIŽO J., BUČKO M., BLATNICKÝ M., SLUŠŇÁK P., 2026

ІНФОРМАЦІЙНО-КЕРУЮЧІ СИСТЕМИ НА ЗАЛІЗНИЧНОМУ ТРАНСПОРТІ

They conducted multibody dynamics simulations to numerically determine the greatest derailment quotients for various combinations of a set of nominal and worn S1002 wheel and UIC60E1 rail profiles.

Another interesting research about the multibody numerical simulations of post-derailments dynamics of a trainset the aim at a comparison between guard rails and derailment containment wall is given by the team of the authors Santelia et al. [6]. They presented the results of the research are focused on supporting the design of effective derailment containment measures through numerical simulation techniques, employing a multibody model to simulate the post-derailment behaviour of a railway trainset. The presented simulation model was combined with a finite element model of a track-based derailment containment device and it was used to predict the forces on the structure resulting from the impact with the derailed train. The key innovations of the presented study consisted in a fact, that it considers the modelling the entire trainset instead of a single vehicle instead of the effect of inter-vehicle interaction forces due to the traction gear and buffers, and the modelling of guard rails as an alternative to derailment containment walls which were previously investigated.

Alizhan et al. examined the modernization of the 61-4179 TVZ passenger coach for transporting light automobiles up to 3 tons, addressing the efficiency of multifunctional rail use in the work [7]. The main goal of the work was to assess the influence of the additional mass-dimensional loading to the strength, load distribution, and the dynamic stability of the vehicle-track system. Two approaches of numerical modelling were applied for the research, namely the finite element methods for determination of a stress distribution, deformations, and safety margins and the multibody dynamics modelling, where the wheel/rail contact forces, wagon body accelerations, and stability coefficients were assessed.

As it is stated in the research [8], the geometry of the wheel/rail contact is a key factor in resolving the dynamics of a rail vehicle. It is generally recognized that the shape used to create both the wheel profile in the rolling region and the railhead has a significant impact on the vehicle's reaction in terms of stability, vibration absorption, and curve-negotiating ability. Analysis of the effects of wheel/rail profile and lateral suspension characteristics on the dynamic hunting stability of rail vehicles moving on tangent tracks is one of the main areas of the presented research. Further, the main goal of the research is reducing vibration in railway wheel/rail profiles by an application of a novel design for enhancing speed.

The authors team Shi et al. [9] devoted their effort to study the proposal of the use of active lateral secondary suspension system to address low-frequency swaying railway vehicle body motion under low wheel-rail concity conditions. This research was also focused on evaluation of railway vehicle dynamics, and it was focused on assessment of the Sperling index for the wagon body swaying motion. Krason et al. [10]

performed numerical tests of the influence of railway bogie suspension on the wagon motion parameters. The research was subjected on dynamic tests of a prototype wagon, which is intended to transport semi-trailers. It means, that in the contrast with the goal of the presented research, it is focused on freight wagons. However, the presented methodology of numerical tests of the dynamics of a freight wagon and the problems of selecting suspension parameters in used bogies of railway wagons moving at chosen speeds on straight and curved tracks can be also applied for a suburban railway vehicle. A phenomenon of high-frequency vibration transmission through primary suspension system is examined in the study [11]. The authors created the multibody vehicle model, which was extended by considering the structural dynamics of the wheelsets, axle boxes and bogie frames, and by employing more detailed models, which describe the dynamic stiffness of the primary suspension components such as roller bearings, hydraulic dampers, rubber bushings and coil springs. The created model served to describe the dynamic behaviour of the bogie in this frequency range. The achieved results of the research showed that the vibrations are mainly transmitted by the rubber bushings. These findings provided a better understanding of the dynamic behaviour of the bogie.

Statement of the purpose and objectives of the study.

Dynamic simulation of the designed railway vehicle represents the main part of the presented research. The process of performing dynamic analysis of the designed railway vehicle includes studying the vehicle parameters, subsequent compilation of its computational model and performing the necessary simulations. The main activities and goals of the presented research are following tasks:

1. To create of a sufficiently accurate computational model of the suburban railway vehicle under consideration, which considers all requirements for performing the relevant simulations.
2. To perform the necessary simulation calculations, which are primarily intended to clarify the impact of changes in suspension parameters on the driving characteristics and dynamic behaviour of the suburban railway vehicle under consideration.
3. To identify critical speed of the solved suburban railway vehicle for the defined parameters.
4. To identify the derailment quotient of the solved suburban railway vehicle during running in a curve for original suspension parameters and for softer suspension system.

A simulation model of the solved suburban railway vehicle. The created the model of the solved suburban passenger wagon in the Simpack software using the following procedure. The vehicle body, which represents the most significant part of the vehicle mass,

ІНФОРМАЦІЙНО-КЕРУЮЧІ СИСТЕМИ НА ЗАЛІЗНИЧНОМУ ТРАНСПОРТІ

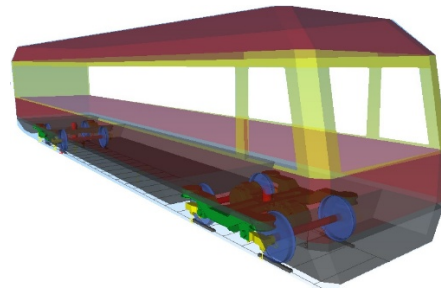
was created by importing a computer aided model that contained defined geometric parameters of the 3D model display and inertia parameters of the body mass. Both bogies were subsequently created as so-called substructures. In principle, they have the same properties, therefore, they are input twice to the model. The three-dimensional model of the bogie frame helped to define mass and inertia properties, including all parts of smaller dimensions, which were included as a fixed part of the frame for rationalization and acceleration of calculations. Separate components included in the bogie substructure were the axle boxes and wheelsets, also imported



a

as three-dimensional models, and the axle bodies. The guide body, i.e. a swinging arms, also included the bearing body itself. The model of the second, as a copy of the original model of the bogie. The UIC 60 rail profile a rail cant of 1:40 was chosen.

Overall, the created multibody model consisted of the following rigid bodies, i.e. a body of the wagon, the bogie frames, the axle boxes guiding, wheelsets. Fig. 2 shows the real vehicle and the multibody model created in the Simpack software



b

Fig. 1. The solved passenger wagon: a - an illustration in reality; b - the model created in the Simpack software

These elements were assigned the appropriate mass and inertia parameters and their mutual position, and the appropriate degrees of freedom were defined. Subsequently, it was necessary to define the mutual connections between the rigid bodies through the so-called connecting elements. These consisted of the following elements, such as a primary suspension consisting of vertical rubber conical springs, rubber conical springs forming the axle bearing guide bushings and further, a secondary suspension consists of pneumatic springs, vertical dampers, lateral dampers, lateral bumpers for the centre pivots.

The primary suspension elements were defined as spring-damper modelling type with an ideal flexible massless element with defined stiffness and damping in a parallel way. The spring stiffness was defined as linear for x , y and z direction. The above method is also applied for creation of the suspension system of the second level, which includes spring elements, rubber emergency springs and the stiffness of the longitudinal guide of centre pivots. It was used also for a model of the element of lateral buffers for centre pivots, which is characterized by a nonlinear stiffness curve and zero damping in the lateral direction, in other directions both parameters will also be zero. The stiffness is constant zero within the limits given by the buffer, and sharply increases to an excessively high value when the clearance defined by the buffer is exhausted.

Results of the research and discussion. The first task was to determine the critical speed of the solved passenger wagon. It was observed the behaviour of the wagon at different running speeds after applying the excitation of the oscillations at the beginning of the movement. Then, it was established the oscillations, at

which, the wheelsets are damped during the movement, i.e. it is a stable state, remain the same, i.e. it is the critical speed, or these oscillations increase to high amplitudes, i.e. it is an unstable state. Therefore, it is determined the critical speed the one at which the oscillations only minimally decay. For this calculation, the wagon running was simulated on a straight track with a standard model of the wheel-rail contact of a length of 500 m. The wagon was excited by an initial excitation in order to occur the oscillations of the wagon. Calculations for individual speeds must be set and started separately and manually. The number of speed variations was set to 15, so that the critical speed area of the vehicle in the range of 1 to 2 km/h at most was found in the most suitable way in 15 steps.

The results of the analysis of the critical running speed for the constant values of the wheelset guidance bushing are depicted in Fig. 2 and Fig. 3. It shows the course of the deflection of the lateral oscillations of the wheelset. It is possible to identify the decreasing amplitude of the vibrations in the case of stable running (Fig. 2), which stabilizes after overcoming the distance approx. 250 to 300 m from the start of the running of the wagon. On the contrary, it increases in the case of unstable running. It is depicted in Fig. 3. It is possible to identify, that with the overcoming distance, the amplitude of the lateral motion increases. It is obvious after 50 m of running. During the stable operation, its highest value was found to be approximately $\pm 0.525 \times 10^{-3}$ m. This can be seen in the distance of approx. 85 to 90 m.

The second task was focused on investigating quasi-static values describing the behaviour of the solved passenger wagon while running in a curve with a specified radius of 350 m. The quasi-static values are determined by a quasi-static analysis. It means, that the model of the track does not include track irregularities,

i.e. the wagon is not excited and only quasi-static values of the output quantities are observed. The model of the railway track consists of an 1200 m long section. The first 50 m are formed of a straight section. This is followed by a 50 m long section forming a transition to a curve with a radius of 350 m and then a 750 m long constant curve. In

a constant curve, the outer rail is raised by 0.12 m compared to the inner one. A transition from the curve to the straight section is of 50 m and the last section of the track is of 300 m.

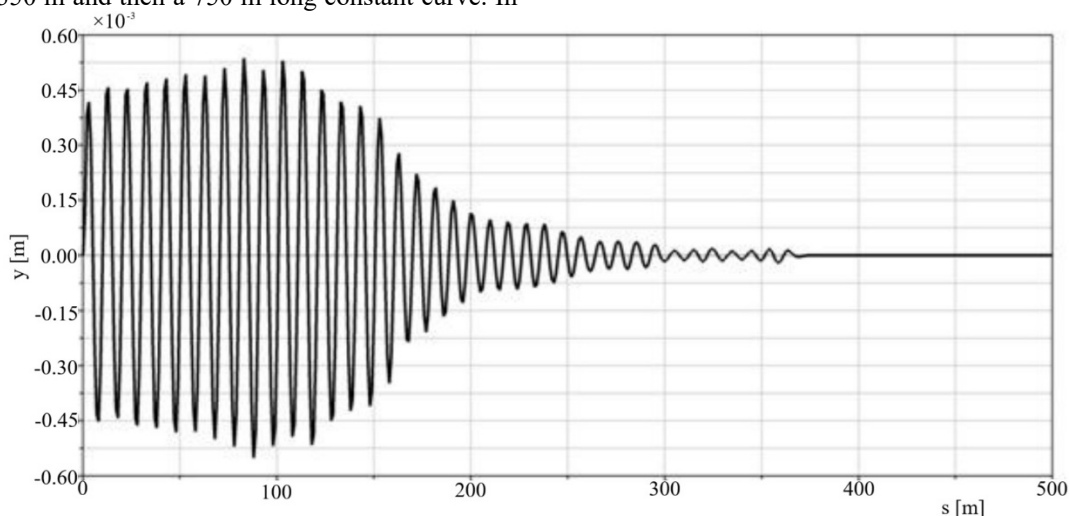


Fig. 2. An illustration of the lateral deflection of the wheelset during the stable movement

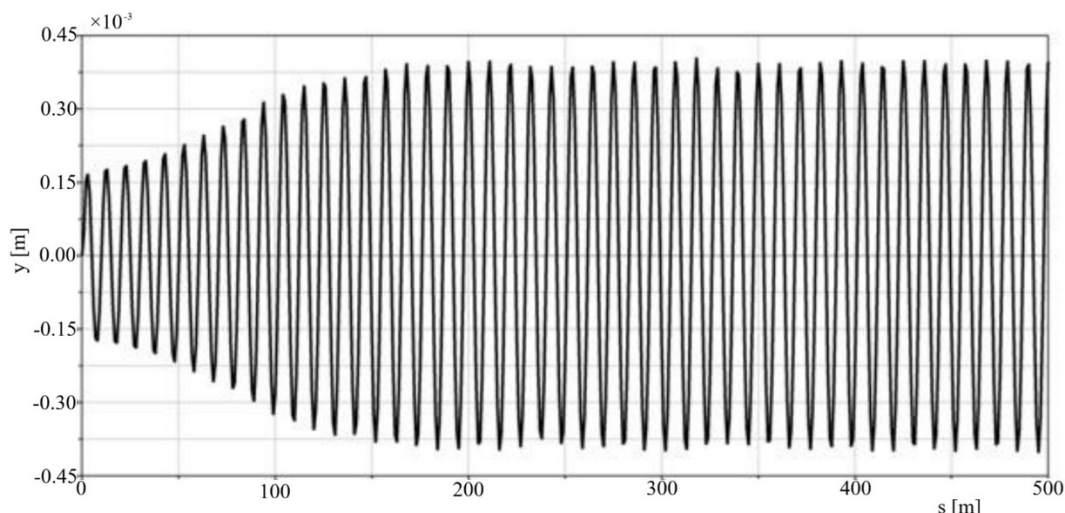


Fig. 3. Illustration of the lateral deflection of the wheelset during the unstable movement

Results of the derailment quotient for the stiffer suspension system are shown in Fig. 4. The evaluation of the derailment safety coefficient Y/Q shows relatively safe values, the maximum is reached by the approaching wheel of the first bogie at a value of 0.75 (a red curve, Fig. 4) when the wagon runs out of the curve. On the approaching wheel of the second wheelset, this value is of 0.22 (a green curve, Fig. 4). On the opposite side wheel of the same wheelset, the derailment quotient is more favourable, it is of 0.5 (a black curve, Fig. 4). The safety values for the 2nd wheelset on the opposite side are slightly more favourable, it is of 0.21 (a blue curve, Fig. 4). According to the standard, the limit value for the safety coefficient is 0.8 [12].

After changing the stiffness of the suspension parameters, values of the observed parameters are also

changed. The results are depicted in Fig. 5. The values of the derailment quotient are obviously improved. This is proven by the achieved values of the derailment quotient. The highest value of the derailment quotient of the 1st wheelset in a curve is approx. of 0.58 (a red line, Fig. 5). The value of the derailment quotient of the opposite wheel of the same wheelset reached the value approx. of 0.42. Further, the values of the derailment quotient of the 2nd wheelset of the same bogie achieved much smaller values. Namely, the derailment quotient of the left wheel reached the value approx. 0.13 and the opposite wheel of the same wheelset, i.e. the right wheel achieved the value of 0.1. Also, these values of the derailment quotient are smaller than the maximal permissible value of 0.8 [12]. The smaller values of the derailment quotient of for the softer suspension system is caused by the fact, that softer suspension system allows to reduce the angle of attack of

the wheelset in a curve. This results to more favourable properties of the railway vehicle. distribution of the wheel forces, i.e. to safer running

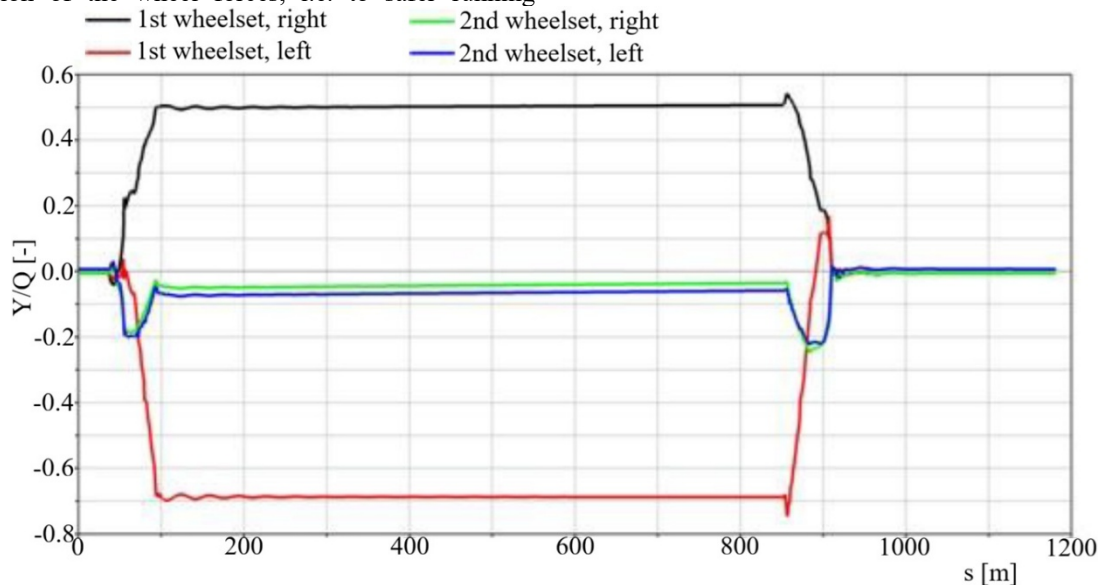


Fig. 4. Illustration of the lateral deflection of the wheelset during the unstable movement

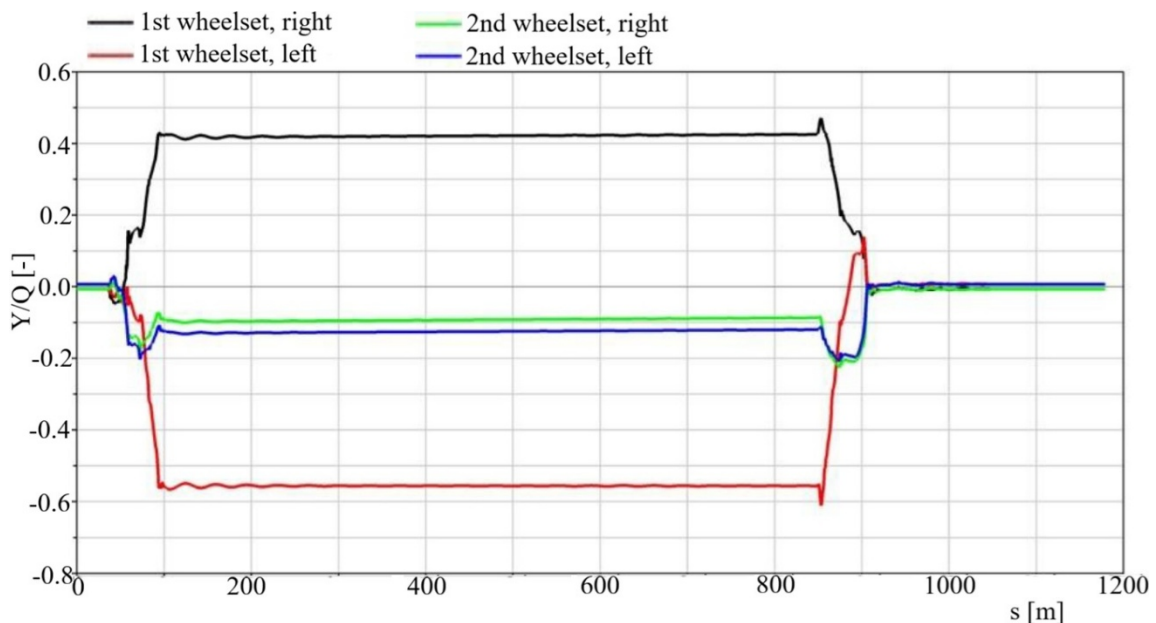


Fig. 5. Illustration of the lateral deflection of the wheelset during the unstable movement

It is considered to perform within the future research another simulation analysis of the solved suburban railway vehicle in order to optimize the parameters of the suspension system. Number of simulations will be performed to find the most suitable response of the vehicle to the excitations caused by the track unevenness. The suspension system will be tuned regarding to ride comfort for passengers and well as regarding to running safety.

Conclusions.

Urban and suburban railway transport represent very important element of the transportation system in the

developed countries as well as in developed cities. Efforts of engineers to find suitable vehicles lead to apply advanced simulation tools to save time and financial costs for development of modern, reliable, comfortable and safe railway vehicles. The presented research was focused on creation of a suburban railway passenger wagon. A commercial simulation software was applied in the research. The main goal of the research was to analyse the critical running speed of the vehicle in a straight railway track as well as running safety in a curved track section. These observed output parameters were evaluated for two types of suspension system, for stiffer suspension parameters as well as for softer suspension parameters. It was found softer suspension parameters lead to slightly better running safety, because the wheelset has a more favourable position relative to the longitudinal track axis.

The maximal permissible value of the derailment quotient of 0.8 was not exceeded for any observed case.

Acknowledgement

This research was supported by the project VEGA 1/0308/24: «Research of dynamic properties of rail vehicles mechanical systems with flexible components when running on a track» and by the project KEGA 028ŽU-4/2026: «Integration of advanced modelling methods and simulation computations into university education of future specialists in vehicles' design».

References

1. Panchenko S., Gerlici J., Lovska A., Vatulja G., Ravlyuk V., Rybin A. Method for determining the factor of dual wedge-shaped wear of composite brake pads for freight wagons. *Communications - Scientific Letters of the University of Žilina*. 2024. 26 (1). P. B31–B40. <https://doi.org/10.26552/com.C.2024.006>
2. Lovska A., Stanovska I., Nerubatskyi V., Hordiienko D., Zinchenko O., Karpenko N., Semenenko Y. Determining features of the stressed state of a passenger car frame with an energy-absorbing material in the girder beam. *Eastern European Journal of Enterprise Technologies*. 2022. 5 (7-119). P. 44–53. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2022.265043>
3. Derevyanchuk O., Lovska A., Ravlyuk V., Dominikov M., Derevianchuk Y. Modern approach to computer modeling of functional 3D objects in the professional training of future engineers and vocational education teachers. *Edelweiss Applied Science and Technology*. 2024. 8 (6). P. 5939–5956. <https://doi.org/10.55214/25768484.v8i6.3290>
4. Gerlici J., Lovska A., Kozáková K. Research into the longitudinal loading of an improved load-bearing structure of a flat car for container transportation. *Designs*. 2025. 9 (1). 12. <https://doi.org/10.3390/designs90100127>
5. Sugathapala N., Kassa E., Pun J., Yan E. Assessment of the influence of wheel and rail wear on flange climbing derailment using derailment criteria. *Vehicle System Dynamics*. 2025. <https://doi.org/10.1080/00423114.2025.2596037>
6. Santelia M., Mazzeo F., Di Gialleonardo E., Melzi S., Bruni S. Multibody numerical simulations of post-derailments dynamics of a trainset: A comparison between guard rails and derailment containment wall. *Advances in Mechanical Engineering*. 2025. 17 (11). <https://doi.org/10.1177/16878132251385799>
7. Alizhan A., Apshikur B., Alimkulov M., Goltsev A., Chernavin V., Almas K. Dynamic behavior of a modernized passenger coach for multimodal transport: effect of wheel wear and clearance optimization. *Future Transportation*. 2025. 5 (4). 168. <https://doi.org/10.3390/futuretransp5040168>
8. Al Satarr S. M. A., Ali K. H. A novel design for enhancing speed and reducing vibration in railway wheel-track profiles. *Mathematical Modelling of Engineering Problems*. 2024. 11 (1). P. 177–184. <https://doi.org/10.18280/mmep.110119>

9. Shi H., Zeng J., Duan L. Carbody swaying suppression for a high-speed rail vehicle by utilising active lateral suspension control. *Vehicle System Dynamics*. 2025. 63 (10). 1998–2017. <https://doi.org/10.1080/00423114.2024.2398005>

10. Krasoń W., Sławiński G., Dobrowolski D. Numerical tests of the influence of railway bogie suspension on the wagon motion parameters. *Acta Mechanica Et Automatica*. 2025. 19 (4). P. 683–694. <https://doi.org/10.2478/ama-2025-0077>

11. Wang Q., Xiao X., Han J., Jin X. Vehicle modelling for high-frequency vibration transmission through primary suspensions. *Vehicle System Dynamics*. 2024. 64 (3). P. 568–610. <https://doi.org/10.1080/00423114.2024.2444398>

12. UIC 518. Testing and approval of railway vehicles from the point of view of their dynamic behaviour – safety – track fatigue – ride quality, 2009.

References

1. Panchenko, S., Gerlici, J., Lovska, A., Vatulja, G., Ravlyuk, V., & Rybin, A. (2024). Method for determining the factor of dual wedge-shaped wear of composite brake pads for freight wagons. *Communications - Scientific Letters of the University of Žilina*, 26(1), B31–B40. <https://doi.org/10.26552/com.C.2024.006>
2. Lovska, A., Stanovska, I., Nerubatskyi, V., Hordiienko, D., Zinchenko, O., Karpenko, N., & Semenenko, Y. (2022). Determining features of the stressed state of a passenger car frame with an energy-absorbing material in the girder beam. *Eastern European Journal of Enterprise Technologies*, 5(7-119), 44–53. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2022.265043>
3. Derevyanchuk, O., Lovska, A., Ravlyuk, V., Dominikov, M., & Derevianchuk, Y. (2024). Modern approach to computer modeling of functional 3D objects in the professional training of future engineers and vocational education teachers. *Edelweiss Applied Science and Technology*, 8(6), 5939–5956. <https://doi.org/10.55214/25768484.v8i6.3290>
4. Gerlici, J., Lovska, A., & Kozáková, K. (2025). Research into the longitudinal loading of an improved load-bearing structure of a flat car for container transportation. *Designs*, 9(1), Article 12. <https://doi.org/10.3390/designs90100127>
5. Sugathapala, N., Kassa, E., Pun, J., & Yan, E. (2025). Assessment of the influence of wheel and rail wear on flange climbing derailment using derailment criteria. *Vehicle System Dynamics*. Advance online publication. <https://doi.org/10.1080/00423114.2025.2596037>
6. Santelia, M., Mazzeo, F., Di Gialleonardo, E., Melzi, S., & Bruni, S. (2025). Multibody numerical simulations of post-derailments dynamics of a trainset: A comparison between guard rails and derailment containment wall. *Advances in Mechanical*

- Engineering*, 17(11). <https://doi.org/10.1177/16878132251385799>
7. Alizhan, A., Apshikur, B., Alimkulov, M., Goltsev, A., Chernavin, V., & Almas, K. (2025). Dynamic behavior of a modernized passenger coach for multimodal transport: Effect of wheel wear and clearance optimization. *Future Transportation*, 5(4), Article 168. <https://doi.org/10.3390/futuretransp5040168>
 8. Al Satarr, S. M. A., & Ali, K. H. (2024). A novel design for enhancing speed and reducing vibration in railway wheel-track profiles. *Mathematical Modelling of Engineering Problems*, 11(1), 177–184. <https://doi.org/10.18280/mmep.110119>
 9. Shi, H., Zeng, J., & Duan, L. (2025). Carbody swaying suppression for a high-speed rail vehicle by utilising active lateral suspension control. *Vehicle System Dynamics*, 63(10), 1998–2017. <https://doi.org/10.1080/00423114.2024.2398005>
 10. Krasoń, W., Sławiński, G., & Dobrowolski, D. (2025). Numerical tests of the influence of railway bogie suspension on the wagon motion parameters. *Acta Mechanica et Automatica*, 19(4), 683–694. <https://doi.org/10.2478/ama-2025-0077>
 11. Wang, Q., Xiao, X., Han, J., & Jin, X. (2024). Vehicle modelling for high-frequency vibration transmission through primary suspensions. *Vehicle System Dynamics*, 64(3), 568–610. <https://doi.org/10.1080/00423114.2024.2444398>
 12. International Union of Railways. (2009). *Testing and approval of railway vehicles from the point of view of their dynamic behaviour – safety – track fatigue – ride quality* (UIC 518).

доц. Я. Діжо, інж. М. Бучко, доц. М. Блатницький, інж. П. Слушняк

ДИНАМІЧНИЙ АНАЛІЗ ПРИМІСЬКОГО ЗАЛІЗНИЧНОГО ТРАНСПОРТНОГО ЗАСОБУ

Залізничний транспорт вважають одним із найекологічніших і найефективніших видів транспорту. Ступінь розвитку інфраструктури залізничного транспорту часто відповідає рівню розвитку країни. Висока якість залізничного транспорту немінуча без високоякісних залізничних транспортних засобів, які працюють на залізничних коліях між пунктами призначення. Залізничний транспорт забезпечує перевезення пасажирів як на короткі, так і довгі відстані. Моделювальні розрахунки є дуже важливими в процесі проектування та аналізу ходових властивостей залізничних транспортних засобів.

Подане дослідження зосереджено на застосуванні симуляційних розрахунків для аналізу ходових властивостей приміського залізничного транспортного засобу. Це пасажирський вагон, призначений для експлуатації в певному місті. Проведені імітаційні розрахунки спрямовані на знаходження вибраних вихідних величин

досліджуваного залізничного транспортного засобу. Ці параметри – критична швидкість і коефіцієнт сходу з рейок як критерій безпечної експлуатації транспортного засобу за розглянутих умов. Визначено критичну швидкість руху, за якої спостерігають бічні зміщення колісної пари. Коли амплітуди бічних коливань колісної пари стабільні, критичної швидкості не досягають. Момент стабільних і нестабільних бічних коливань колісної пари є визначальним для критичної швидкості руху. Іншим контрольованим параметром безпеки руху був коефіцієнт сходу з рейок. Коефіцієнт сходу з рейок спостерігали для першої і другої колісних пар у напрямку руху. Досліджено два рівні жорсткості системи підвіски. Виявлено, що м'якша система підвіски призводить до безпечнішого руху залізничного транспортного засобу в кривій. Допустиме значення коефіцієнта сходу з рейок не було досягнуто в жодному випадку.

Ключові слова: залізничний транспортний засіб, система підвіски, багатотільне моделювання, динаміка транспортного засобу.

Ján Dižo, Associate Professor, Philosophy Doctor, associate professor at the Department of Transport and Handling Machines, Faculty of Mechanical Engineering, University of Žilina. Tel.: +421 41 513 2650. E-mail: jan.dizo@fstroj.uniza.sk.

Martin Bučko, mechanical Engineer, PhD student at the Department of Transport and Handling Machines, Faculty of Mechanical Engineering, University of Žilina. E-mail: martin.bucko@fstroj.uniza.sk.

Miroslav Blatnický, Associate Professor, Philosophy Doctor, associate professor at the Department of Transport and Handling Machines, Faculty of Mechanical Engineering, University of Žilina. Tel.: +421 41 513 2659. E-mail: miroslav.blatnicky@fstroj.uniza.sk.

Partik Slušňák, mechanical Engineer, PhD student at the Department of Transport and Handling Machines, Faculty of Mechanical Engineering, University of Žilina. E-mail: patrik.slusnak@fstroj.uniza.sk.

Стаття надійшла 12.03.26

Стаття прийнята до друку після рецензування 02.04.26

Стаття опублікована (оприлюднена) 29.05.26

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

ПРОХОРОВ В.М., к.т.н., доцент,
 ПАРХОМЕНКО Л.А., д.т.н., професор,
 КРАВЧЕНКО М.А., доктор філософії,
 КАЛАШНІКОВА Т.Ю., к.т.н., доцент,

Застосування часових мереж Петрі як обчислювального ядра цифрового двійника на прикладі задачі побудови розкладу залізничної мережі з крос-докінгом

Анотація. Запропоновано використання часових мереж Петрі як обчислювального ядра цифрового двійника залізничної транспортної системи для задачі побудови розкладу маятникових поїздів у мережі з крос-докінгом. На відміну від імітаційних підходів, часові мережі Петрі мають чітку алгебраїчну семантику, що дозволяє не лише розраховувати розклад, а й аналітично досліджувати властивості системи. Розроблено алгоритм симуляції методом черги подій, який автоматично знаходить усталений режим: мінімальний період курсування та розклад перевантажень. Експериментально доведено єдиність цього режиму, що свідчить про здатність системи до самосинхронізації. Запропонований підхід забезпечує автоматичний перерахунок розкладу при зміні умов експлуатації без участі диспетчера.

Ключові слова: часові мережі Петрі, цифровий двійник, крос-докінг, маятниковий поїзд, розклад руху, синхронізація, усталений режим, залізнична мережа.

Постановка проблеми.

Концепція цифрового двійника (ЦД) транспортної системи передбачає створення динамічної обчислювальної моделі, що в режимі реального часу відображає стан фізичної інфраструктури та забезпечує підтримку прийняття управлінських рішень. Ключовою вимогою до такої моделі є наявність обчислювального ядра – формального математичного апарату, здатного розраховувати параметри функціонування системи при зміні умов експлуатації.

Більшість існуючих реалізацій ЦД транспортних систем використовують імітаційне моделювання або підходи на основі машинного навчання. Ці методи відтворюють спостережувану поведінку системи, проте мають суттєвий недолік: вони не забезпечують аналітичних гарантій щодо властивостей отриманого розв'язку – зокрема, не доводять існування та єдиності усталеного режиму роботи системи.

Часові мережі Петрі [1] є формальним математичним апаратом для моделювання паралельних дискретно-подієвих процесів з часовими характеристиками. На відміну від імітаційних підходів, вони дозволяють не лише відтворювати поведінку системи, але й аналітично досліджувати її властивості – зокрема, доводити існування та єдиність усталеного режиму. Це робить їх природним кандидатом на роль обчислювального ядра ЦД.

Часові мережі Петрі є формальним математичним апаратом з чіткою алгебраїчною семантикою для моделювання паралельних дискретно-подієвих процесів з часовими характеристиками. На відміну від імітаційного моделювання, яке є лише програмною реалізацією без

строгого математичного підґрунтя, мережі Петрі мають формально визначені правила спрацьовування переходів, поняття досяжності маркувань та доведені теореми про властивості системи. Це принципова відмінність: імітаційна модель може відтворювати поведінку системи, але не може довести що ця поведінка є єдино можливою. Мережі Петрі, завдяки своїй формальній семантиці, дозволяють не лише відтворювати поведінку, але й аналітично доводити існування та єдиність усталеного режиму – що є ключовою вимогою до обчислювального ядра ЦД.

Аналіз літератури та постановка проблеми.

Концепція ЦД елементів залізничної транспортної системи активно розвивається в останні роки.

У статті [2] запропоновано методологію створення ЦД на основі фізичного моделювання для застосувань у прогнозованому технічному обслуговуванні, яка складається з двох основних етапів: створення цифрової моделі та впровадження концепції ЦД, але все ж не враховано питання інтеграції запропонованого підходу з існуючими системами управління виробництвом в реальному часі.

У статті [3] запропоновано кіберфізичну систему на основі ЦД для моніторингу та прогнозного управління довгопрогоновим високошвидкісним залізничним мостом, що поєднує фізичне моделювання, машинне навчання (точність 91 %) та нечітку логіку для підтримки рішень, але не враховано масштабованість на мережу мостів та інтеграцію з існуючими диспетчерськими системами.

© ПРОХОРОВ В.М., ПАРХОМЕНКО Л.А., КРАВЧЕНКО М.А., КАЛАШНІКОВА Т.Ю., 2026

ІНФОРМАЦІЙНО-КЕРУЮЧІ СИСТЕМИ НА ЗАЛІЗНИЧНОМУ ТРАНСПОРТІ

У статті [4] запропоновано методологію впровадження ЦД для цифровізації технічного обслуговування залізничного рухомого складу з урахуванням вимог регламенту ЄС 779/2019, що поєднує сервісний підхід, платформенну архітектуру та модельну цифровізацію активів, але не враховано питання інтеграції запропонованого рішення з існуючими системами управління життєвим циклом (ALM/PLM) виробників рухомого складу та кібербезпеку в умовах розподілених даних.

Задачі побудови і корегування розкладів руху, схем циркуляції рухомого складу постають майже всюди при розгляді залізничних систем, але вони чомусь дуже рідко розглядалися в контексті концепції ЦД.

Сучасний стан досліджень у галузі ЦД транспортних систем та формальних методів побудови розкладів дозволяє виокремити кілька взаємопов'язаних напрямів, кожен з яких має суттєві обмеження з точки зору поставленої задачі. Розрахунок періодичних розкладів транспортних систем найбільш повно формалізований в рамках задачі побудови розкладів періодичних подій (англ. Periodic Event Scheduling Problem, PESP).

Вона є одним із найбільш цікавих підходів і яка вважається добре вивченою, але відомою своєю внутрішньою складністю та необхідністю побудови громіздких моделей цілочисельного програмування.

У статті [5] запропоновано підхід до PESP на основі зведеної моделі з фіксованими мінімальними часами руху та стоянок, що дозволяє звести задачу до узгодження ліній і застосувати ефективну евристику на основі парування, але не враховано адаптацію методу до реальних обмежень інфраструктури та можливість урахування стохастичних відхилень у часі виконання рейсів.

У статті [6] запропоновано метод генерації стовпців для розв'язання задачі PESP на основі дискретизації часу та використання шляхових формулювань із циклами на розширеному графі, що дозволяє покращити нижню межу LP-релаксації, але не враховано адаптацію методу до великих реальних мереж через зростання розмірності задачі та інтеграцію з маршрутизацією пасажирів у динамічних умовах.

У статті [7] запропоновано підхід до складання залізничного розкладу на основі лагранжевої релаксації, яка дозволяє розділити задачу на окремі динамічні програми для кожного потяга та отримати розклад із відхиленням у межах кількох відсотків від оптимуму, але не враховано періодичність розкладу та можливість інтеграції з пасажиропотоками в реальному часі.

Ці методи дозволяють знаходити досяжні розклади для великих мереж, проте мають принциповий недолік з точки зору ЦД: вони є офлайн-методами оптимізації і не придатні для роботи в режимі реального часу при динамічній зміні параметрів мережі. Крім того, PESP-підходи не моделюють фізичний процес руху поїздів і не

доводять що знайдений розклад є оптимальним або єдиним усталеним режимом системи.

Крос-докінг як принцип організації перевантажень без проміжного складування широко досліджується в контексті автомобільної логістики [8]. Застосування крос-докінгу на залізничному транспорті розглядається у поодиноких роботах переважно на концептуальному рівні, без формалізації задачі синхронізації розкладів. Задача одночасного прибуття поїздів до вузлової станції для обміну контейнерами в контексті маятникового руху у літературі формально не розглядалась.

Таким чином, існує науковий пробіл: відсутній формальний метод побудови розкладу маятникових поїздів у мережах з крос-докінгом, який би одночасно мав строге математичне підґрунтя, доводив існування та єдиність усталеного режиму, і міг функціонувати як обчислювальне ядро ЦД в режимі реального часу. Заповнення цього пробілу є метою даної роботи.

Мета та задачі дослідження.

Метою дослідження є розробка методу побудови розкладу маятникових поїздів у залізничній мережі з крос-докінгом на основі часових мереж Петрі та його застосування як обчислювального ядра ЦД транспортної системи.

Для досягнення мети поставлено такі задачі:

1. Формалізувати задачу синхронізації розкладів маятникових поїздів у мережах з крос-докінгом у термінах часових мереж Петрі, визначивши відповідність між елементами транспортної мережі та елементами мережі Петрі.

2. Розробити алгоритм симуляції побудованої мережі Петрі для знаходження усталеного режиму роботи системи – мінімального періоду курсування T_c та розкладу перевантажень на вузлових станціях.

3. Експериментально дослідити властивість єдиності усталеного режиму – незалежність T_c та розкладу від початкового стану системи.

4. Продемонструвати застосування розробленого методу на тестовій мережі та верифікувати отримані результати.

5. Обґрунтувати використання запропонованого методу як обчислювального ядра ЦД транспортної системи, розробленого у роботі [9], та показати його здатність до роботи в режимі реального часу при зміні параметрів мережі.

Матеріали та методи дослідження.

Об'єктом дослідження є процес синхронізації розкладів маятникових поїздів у залізничній мережі з крос-докінгом, топологія якої сформована відповідно до методу, запропонованого у роботі [9].

Предметом дослідження є формальні моделі та алгоритми побудови усталеного розкладу транспортної мережі на основі часових мереж Петрі.

Основна гіпотеза дослідження полягає в тому, що задача синхронізації маятникових поїздів у

ІНФОРМАЦІЙНО-КЕРУЮЧІ СИСТЕМИ НА ЗАЛІЗНИЧНОМУ ТРАНСПОРТІ

мережах з крос-докінгом може бути формалізована як часова мережа Петрі, усталений режим якої є єдиним і не залежить від початкового стану системи.

Часові мережі Петрі – це розширення класичних мереж Петрі, в якому кожному переходу або позиції призначається часова затримка. Формально часова мережа Петрі визначається як кортеж $M = (P, T, F, W, D, M_0)$, де P – скінченна множина позицій, T – скінченна множина переходів, $F \subseteq (P \times T) \cup (T \times P)$ – множина дуг, $W: F \rightarrow \mathbb{N}$ – функція ваг дуг, $D: T \rightarrow \mathbb{R}^+$ – функція часових затримок переходів, $M_0: P \rightarrow \mathbb{N}$ – початкова маркіровка. Перехід t спрацьовує коли кожна вхідна позиція містить не менше $W(p, t)$ токенів; після спрацювання через час $D(t)$ токени переміщуються до вихідних позицій.

Відображення транспортної мережі на мережу Петрі. Залізнична мережа $G = (V, E)$ з множиною вузлових станцій V та множиною маршрутів E відображається на часову мережу Петрі таким чином.

Кожна вузлова станція $H_i \in V$ відповідає переходу t_i з часовою затримкою τ_i – тривалістю перевантаження. Перехід t_i спрацьовує коли на всіх його вхідних позиціях є токени, тобто коли всі поїзди що обслуговують станцію H_i прибули.

Кожен маршрут $(i, j) \in E$ породжує дві позиції: p_{ij} – поїзд рухається з H_i до H_j , та p_{ji} – поїзд рухається з H_j до H_i . Дуга від переходу t_i до позиції p_{ij} має вагу 1. Дуга від позиції p_{ij} до переходу t_j також має вагу 1. Часова затримка позиції p_{ij} дорівнює t_{ij} – часу руху по маршруту в напрямку $i \rightarrow j$.

Початкова маркіровка M_0 визначає початкові положення поїздів: токен у позиції p_{ij} означає що поїзд на маршруті (i, j) рухається у напрямку $i \rightarrow j$. Оскільки на кожному маршруті курсує рівно один поїзд, сума токенів у позиціях p_{ij} та p_{ji} дорівнює одиниці для кожного $(i, j) \in E$.

Алгоритм знаходження усталеного режиму. Симуляція побудованої мережі Петрі виконується методом черги подій (англ. event-driven simulation). Стан системи описується чергою подій вигляду {час, вузол, маршрут, напрямок}. На кожному кроці обробляється найбільш рання подія – прибуття поїзда до вузлової станції. Коли всі поїзди що обслуговують станцію S_i зібрались, фіксується момент початку перевантаження, через час τ_i всі поїзди відправляються у зворотньому напрямку i до черги додаються нові події прибуття.

Усталений режим визначається як стан коли інтервали між послідовними перевантаженнями на кожній станції стабілізуються. Мінімальний період T_c обчислюється як середнє значення стабілізованих інтервалів. Розклад усталеного режиму визначається як вектор фаз $\varphi = [\varphi_1, \dots, \varphi_n]^T$ де φ_i – момент перевантаження на станції S_i за модулем T_c відносно фіксованої опорної станції.

Верифікація розкладу. Коректність знайденого розкладу перевіряється умовою: для

кожного маршруту $(i, j) \in E$ повинні виконуватись два обмеження – $(\varphi_j - \varphi_i) \bmod T_c \geq \tau_i + t_{ij}$ та $(\varphi_i - \varphi_j) \bmod T_c \geq \tau_j + t_{ji}$ – що гарантує фізичну можливість розкладу: жоден поїзд не перебуває одночасно у двох місцях.

Реалізація. Алгоритм реалізовано у середовищі MATLAB. Черга подій реалізована як масив клітинок відсортований за часом. Для знаходження усталеного режиму симуляція виконується до накопичення не менше п'ятнадцяти перевантажень на кожній станції, після чого T_c обчислюється за останніми п'ятьма інтервалами.

Викладення основного матеріалу дослідження. Для апробації запропонованого підходу обрано тестову мережу з шести вузлових станцій та десяти маршрутів (рис. 1).

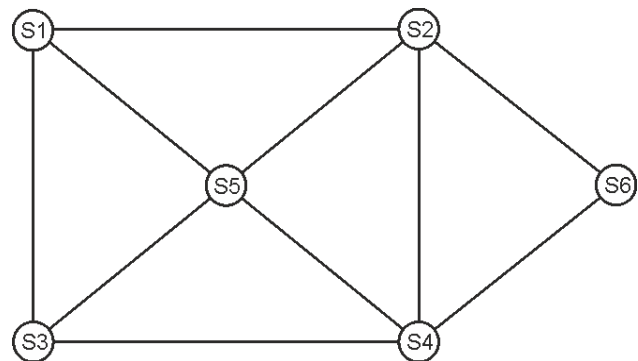


Рис. 1. Граф мережі системи залізничної доставки контейнерів з крос-докінгом

Топологія мережі складається з прямокутника з двома діагоналями – з центральним вузлом S5 у точці їх перетину – та трикутника з правого боку що з'єднує станції S2, S4 та S6. Параметри маршрутів наведено в табл. 1. Тривалість перевантаження $\tau_i = 15$ хв на всіх станціях.

Таблиця 1 – Параметри маршрутів тестової мережі

Маршрут	t_{ij} , хв	t_{ji} , хв
S1-S2	55	60
S1-S3	50	45
S1-S5	35	40
S2-S4	60	55
S2-S5	30	35
S2-S6	70	65
S3-S4	55	50
S3-S5	40	35
S4-S5	35	40
S4-S6	65	70

Побудова часової мережі Петрі. Відповідно до запропонованого відображення тестова мережа породжує часову мережу Петрі з 6 переходами (по одному на кожен вузлову станцію) та 20 позиціями (по дві на кожен маршрут).

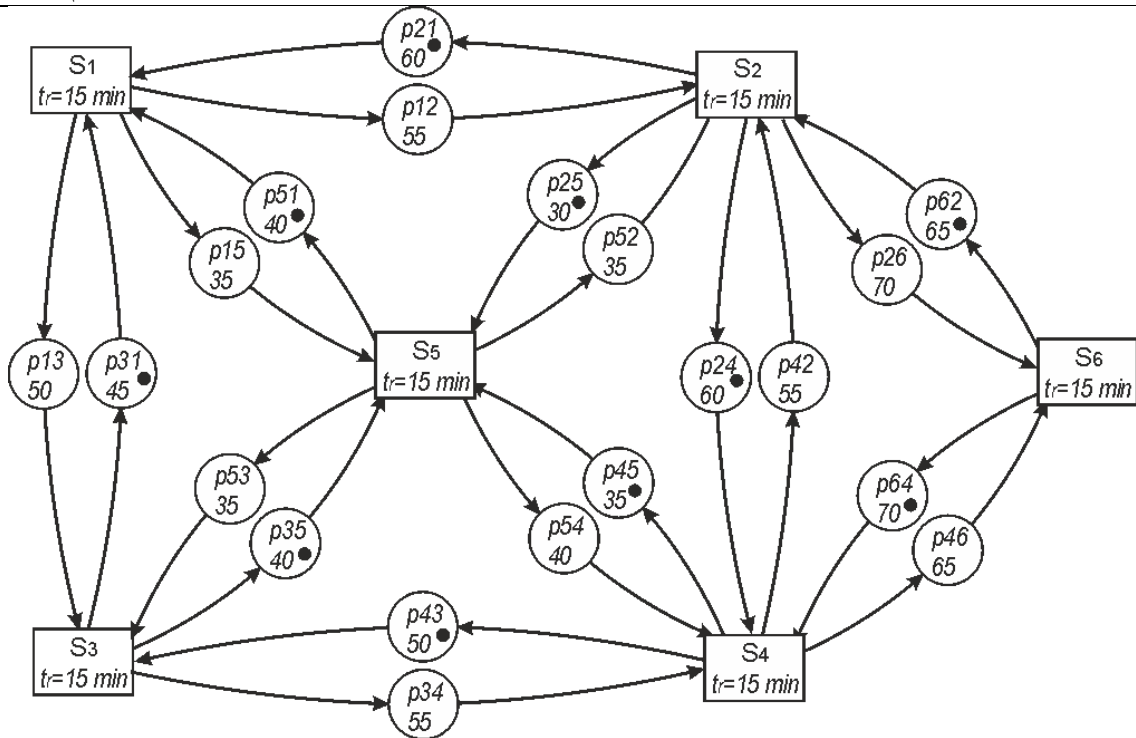


Рис. 2. Граф мережі системи залізничної доставки контейнерів з крос-докінгом

Ступінь кожного переходу дорівнює кількості маршрутів що примикають до відповідної станції: переходи t_1, t_3 мають ступінь 3, переходи t_2, t_4, t_5 мають ступінь 4, перехід t_6 має ступінь 2. Початкова маркіровка M_0 містить по одному токєну в одній з двох позицій кожного маршруту – у даному випадку всі поїзди стартують з позицій p_{ij} тобто рухаються від вузла з меншим номером до вузла з більшим.

Результати симуляції. Симуляція часової мережі Петрі виконувалась до накопичення п'ятнадцяти перевантажень на кожній станції. Моменти перевантажень на станціях у процесі симуляції (перші 8 циклів) наведено в табл. 2.

Таблиця 2 – Моменти перевантажень у процесі симуляції

Станція	Моменти перевантажень, хв
S1	300, 550, 800, 1050, 1300, 1550, 1800, 2050
S2	225, 475, 725, 975, 1225, 1475, 1725, 1975
S3	220, 470, 720, 970, 1220, 1470, 1720, 1970
S4	155, 405, 655, 905, 1155, 1405, 1655, 1905
S5	40, 350, 600, 850, 1100, 1350, 1600, 1850
S6	70, 310, 560, 810, 1060, 1310, 1560, 1810

Аналіз інтервалів між послідовними перевантаженнями показує що після короткого

перехідного процесу всі інтервали стабілізуються на значенні 250 хв. Це підтверджує існування усталеного режиму з мінімальним періодом $T_c = 250$ хв.

Єдиність усталеного режиму. Для дослідження властивості єдиності проведено серію експериментів з різними початковими маркіровками. Для кожної з $2^{10} = 1024$ можливих початкових маркіровок (всі комбінації напрямків руху поїздів у початковий момент) виконано симуляцію та визначено T_c усталеного режиму. У всіх 1024 випадках отримано $T_c = 250$ хв з тим самим вектором фаз з точністю до зсуву. Це експериментально підтверджує що усталений режим є єдиним та не залежить від початкового стану системи.

Усталений розклад. Вектор фаз усталеного режиму відносно станції S1 наведено в табл. 3.

Таблиця 3 – Розклад перевантажень усталеного режиму

Станція	Фаза, хв	Початок перевантаження	Відправлення поїздів
S1	0	0	15
S2	175	175	190
S3	170	170	185
S4	105	105	120
S5	50	50	65
S6	10	10	25

Повний розклад руху поїздів з моментами відправлення та прибуття наведено в табл. 4.

ІНФОРМАЦІЙНО-КЕРУЮЧІ СИСТЕМИ НА ЗАЛІЗНИЧНОМУ ТРАНСПОРТІ

Таблиця 4 – Розклад руху поїздів усталеного режиму

Поїзд	Відпр. S_i , хв	Приб. S_j , хв	Відпр. S_j , хв	Приб. S_i , хв
1↔2	15	70	190	0
1↔3	15	65	185	230
1↔5	15	50	65	105
2↔4	190	0	120	175
2↔5	190	220	65	100
2↔6	190	10	25	90
3↔4	185	240	120	170
3↔5	185	225	65	100
4↔5	120	155	65	105
4↔6	120	185	25	95

Верифікація розкладу. Перевірка всіх двадцяти різницевих обмежень підтвердила фізичну коректність розкладу – жоден поїзд не перебуває одночасно у двох місцях (табл. 5).

Таблиця 5 – Верифікація розкладу

Марш рут	$\Delta(i \rightarrow j)$, хв	Потрібно	$\Delta(j \rightarrow i)$, хв	Потрібно	Статус
1↔2	175	≥ 70	75	≥ 75	✓
1↔3	155	≥ 65	95	≥ 60	✓
1↔5	50	≥ 50	200	≥ 55	✓
2↔4	75	≥ 75	175	≥ 70	✓
2↔5	125	≥ 45	125	≥ 50	✓
2↔6	85	≥ 85	165	≥ 80	✓
3↔4	185	≥ 70	65	≥ 65	✓
3↔5	145	≥ 55	105	≥ 50	✓
4↔5	195	≥ 50	55	≥ 55	✓
4↔6	155	≥ 80	95	≥ 85	✓

Діаграма циркуляції поїздів. На рис. 2 наведено діаграму циркуляції поїздів для чотирьох послідовних періодів усталеного режиму.

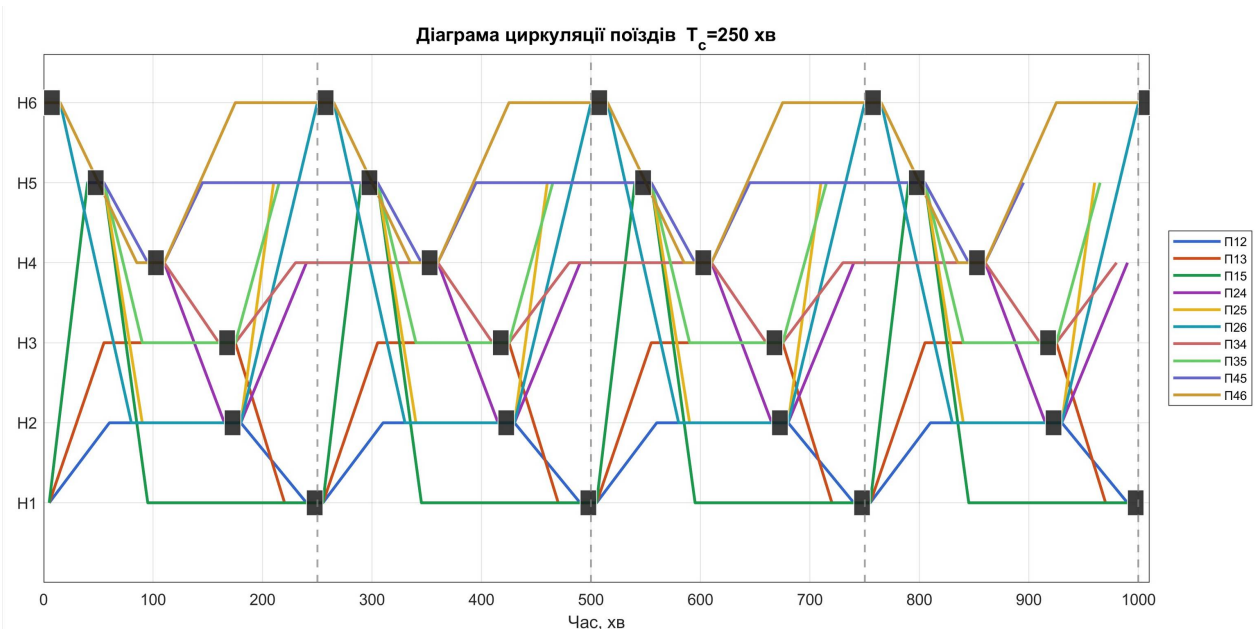


Рис. 3. Діаграма циркуляції поїздів на мережі

Кожен поїзд зображено окремою кольоровою лінією з пилкоподібною траєкторією між двома кінцевими станціями. Горизонтальні сегменти відповідають часу очікування поїзда на станції до початку перевантаження. Чорні прямокутники позначають моменти перевантаження на кожній станції. Діаграма наочно підтверджує що паттерн точно повторюється кожні $T_c = 250$ хв.

Реакція системи на зміну параметрів. Для демонстрації можливостей ЦД розглянуто сценарій зміни параметрів мережі – збільшення часу руху на маршруті S_1-S_3 з 50 до 350 хв внаслідок тривалих ремонтних робіт. Після оновлення параметрів та повторної симуляції отримано новий усталений режим з $T_c = 425$ хв. Система автоматично знайшла

новий розклад без будь-якого втручання користувача. Це демонструє ключову властивість запропонованого підходу як обчислювального ядра ЦД – здатність до автоматичного перерахунку розкладу при зміні умов експлуатації.

Застосування як обчислювального ядра цифрового двійника. Запропонована модель природно вписується в трірівневу архітектуру ЦД транспортної системи розроблену у роботі [9]. Перший рівень – структурна модель мережі – залишається незмінним. Другий рівень – операційна модель – реалізується запропонованим алгоритмом симуляції часової мережі Петрі який замінює імітаційне моделювання на основі мереж Петрі з чіткою формальною семантикою. Третій рівень – підсистема прийняття рішень – отримує від другого рівня T_c та вектор фаз і

ІНФОРМАЦІЙНО–КЕРУЮЧІ СИСТЕМИ НА ЗАЛІЗНИЧНОМУ ТРАНСПОРТІ

використовує їх для підтримки диспетчерських рішень.

Обчислювальна складність одного запуску симуляції є лінійною відносно кількості подій що робить метод придатним для роботи в режимі реального часу. При зміні будь-якого параметра мережі новий розклад знаходиться за час що не перевищує кількох секунд навіть для мереж реалістичного розміру.

Висновки.

В результаті проведеного дослідження розроблено метод побудови розкладу маятникових поїздів у залізничних мережах з крос-докінгом на основі часових мереж Петрі та обґрунтовано його застосування як обчислювального ядра ЦД транспортної системи. Отримані результати дозволяють сформулювати такі висновки.

1. Запропоновано формалізацію задачі синхронізації розкладів маятникових поїздів у мережах з крос-докінгом у термінах часових мереж Петрі. Встановлено відповідність між елементами транспортної мережі та елементами мережі Петрі: вузлові станції відображаються на переходи з часовою затримкою t_r , маршрути – на пари позицій з затримками що відповідають часам руху. Така формалізація забезпечує чітку алгебраїчну семантику моделі на відміну від імітаційних підходів.

2. Розроблено алгоритм симуляції побудованої часової мережі Петрі методом черги подій для знаходження усталеного режиму роботи системи. Алгоритм автоматично визначає мінімальний період курсування T_c та вектор фаз перевантажень на вузлових станціях без будь-яких апіорних припущень щодо структури розкладу.

3. Експериментально доведено єдиність та стійкість усталеного режиму: для всіх 1024 можливих початкових маркіровок тестової мережі отримано однаковий $T_c = 250$ хв з тим самим вектором фаз. Це означає що система автоматично синхронізується до єдиного оптимального розкладу незалежно від початкового стану – диспетчер може запустити поїзди у довільних позиціях і система сама прийде до усталеного режиму.

4. Проведено апробацію запропонованого методу на тестовій мережі з шести вузлових станцій та десяти маршрутів. Отримано $T_c = 250$ хв та повний розклад руху поїздів. Верифікація підтвердила фізичну коректність розкладу – всі двадцять різницевих обмежень виконуються. Діаграма циркуляції поїздів наочно демонструє стабільний паттерн що точно повторюється кожні 250 хв.

5. Продемонстровано застосування методу як обчислювального ядра ЦД транспортної системи. При зміні часу руху на одному маршруті система автоматично перераховує новий усталений режим з $T_c = 425$ хв без втручання користувача. Обчислювальна складність методу є лінійною

відносно кількості подій що забезпечує роботу в режимі реального часу.

Порівняно з існуючими підходами запропонований метод має принципову перевагу: він не лише знаходить розклад але й гарантує через формальну семантику мереж Петрі що знайдений режим є єдиним усталеним для даної мережі. Це якісна відмінність від імітаційних підходів які відтворюють поведінку але не доводять її властивостей.

Перспективи подальших досліджень включають аналітичне обґрунтування залежності T_c від параметрів мережі, розширення моделі на випадок кількох поїздів на маршруті, а також інтеграцію з реальними системами управління перевізним процесом залізниці.

Список використаних джерел

- Li L., Wang C., Zhang H., Liu D. Minimum initial state estimation of labeled time Petri nets in the presence of unobservable transitions. *Information Sciences*. 2026. Vol. 722. Article 122618. DOI: 10.1016/j.ins.2025.122618.
- Aivaliotis P., Georgoulas K., Chryssolouris G. Methodology for enabling Digital Twin using advanced physics-based modelling in predictive maintenance. *Procedia CIRP*. 2019. Vol. 81. P. 417–422.
- Tan Z., Peng Y., Wang J., Gou H., Li W., Bao Y., Pu Q. Digital twin-based cyber-physical system for intelligent monitoring and predictive operation of long-span high-speed railway arch bridges. *Structures*. 2025. Vol. 82. Article 110609.
- Mendes G., Ferreira A. Application of Digital Twin Technology for the Digitization of Railway Maintenance Services in compliance with European Regulation EU 779/2019. *IFAC-PapersOnLine*. 2024. Vol. 58, No. 8. P. 229–234.
- Pätzold J., Schöbel A. A Matching Approach for Periodic Timetabling. 16th Workshop on Algorithmic Approaches for Transportation Modelling, Optimization, and Systems (ATMOS 2016) / OpenAccess Series in Informatics (OASISs). 2016. Vol. 54. P. 1:1–1:15.
- Riedmuller S., Lindner N. Column Generation for Periodic Timetabling. 2025. 14 p. Corpus ID: 282064331. URL: <https://www.semanticscholar.org/paper/282064331>
- Brännlund U., Lindberg P., Nöu A., Nilsson J. Railway Timetabling Using Lagrangian Relaxation. *Transportation Science*. 1998. Vol. 32, No. 4. P. 358–369. DOI: 10.1287/trsc.32.4.358.
- Chen X., Hai Y., Lang M. A rolling horizon based bi-objective optimization approach for dynamic truck dispatching with cross-dock door assignment. *Computers & Industrial Engineering*. 2026. Vol. 202. Article 110927. DOI: 10.1016/j.cie.2026.110927.
- Прохоров В. М., Пархоменко Л.А., Кофанов О.В., Ребрун В.О. Формування системи залізничної доставки контейнерів на основі поєднання концепцій PSR, регулярної експрес-логістики та цифрових двійників. *Збірник наукових праць*

References

1. Li, L., Wang, C., Zhang, H., & Liu, D. (2026). Minimum initial state estimation of labeled time Petri nets in the presence of unobservable transitions. *Information Sciences*, 722, Article 122618. <https://doi.org/10.1016/j.ins.2025.122618>
2. Aivaliotis, P., Georgoulas, K., & Chryssolouris, G. (2019). Methodology for enabling digital twin using advanced physics-based modelling in predictive maintenance. *Procedia CIRP*, 81, 417–422.
3. Tan, Z., Peng, Y., Wang, J., Gou, H., Li, W., Bao, Y., & Pu, Q. (2025). Digital twin-based cyber-physical system for intelligent monitoring and predictive operation of long-span high-speed railway arch bridges. *Structures*, 82, Article 110609.
4. Mendes, G., & Ferreira, A. (2024). Application of digital twin technology for the digitization of railway maintenance services in compliance with European Regulation EU 779/2019. *IFAC-PapersOnLine*, 58(8), 229–234.
5. Pätzold, J., & Schöbel, A. (2016). A matching approach for periodic timetabling. In *16th Workshop on Algorithmic Approaches for Transportation Modelling, Optimization, and Systems (ATMOS 2016)* (Vol. 54, pp. 1:1–1:15). OpenAccess Series in Informatics (OASIS).
6. Riedmüller, S., & Lindner, N. (2025). *Column generation for periodic timetabling*. Semantic Scholar. <https://www.semanticscholar.org/paper/282064331>
7. Brännlund, U., Lindberg, P., Nöu, A., & Nilsson, J. (1998). Railway timetabling using Lagrangian relaxation. *Transportation Science*, 32(4), 358–369. <https://doi.org/10.1287/trsc.32.4.358>
8. Chen, X., Hai, Y., & Lang, M. (2026). A rolling horizon based bi-objective optimization approach for dynamic truck dispatching with cross-dock door assignment. *Computers & Industrial Engineering*, 202, Article 110927. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2026.110927>
9. Prokhorov, V. M., Parkhomenko, L. A., Kofanov, O. V., & Rebrun, V. O. (2025). Formuvannya systemy zaliznychnoi dostavky konteineriv na osnovi poiednannya kontseptsii PSR, rehuliarnoi ekspres-lohistyky ta tsyfrovyykh dviinykiv [Formation of a railway container delivery system based on a combination of PSR concepts, regular express logistics, and digital twins]. *Zbirnyk naukovykh prats UkrDUZT [Collection of Scientific Papers of UkrSURT]*, (212).

Viktor Prokhorov, Larysa Parkhomenko, Mykhailo Kravchenko, Tetiana Kalashnikova

Abstract. *This paper proposes the use of timed Petri nets as the computational core of a digital twin for a railway transport system, illustrated by the problem of train schedule construction in a cross-docking network. Unlike simulation-based approaches that reproduce observed system behavior without rigorous mathematical foundations, timed Petri nets possess a well-defined algebraic semantics that enables not only schedule computation but also analytical investigation of system properties. A mapping of a pendulum train cross-docking railway network onto a timed Petri net is proposed, in which hub stations correspond to transitions and routes correspond to places with time delays. An event-driven simulation algorithm is developed that automatically finds the steady-state operating regime — the minimum circulation period and the reloading schedule at hub stations. The key result is the experimentally proven uniqueness of the steady-state regime: for all possible initial system states the same schedule is obtained, which implies the system's capacity for automatic self-synchronization. Validation on a test network with six hub stations and ten routes confirmed the correctness of the method and demonstrated its response to network parameter changes in real time. The proposed approach extends the digital twin architecture for transport systems developed by the authors in a previous work, where the optimized network topology serves as the structural core and the timed Petri net provides computation of operational parameters. The practical value of the results lies in the possibility of automatic schedule recalculation when operating conditions change without dispatcher intervention.*

Keywords: *timed Petri nets, digital twin of transport system, cross-docking, pendulum train, train schedule, synchronization, steady-state regime, railway network.*

Прохоров Віктор Миколайович, доктор технічних наук, професор кафедри управління експлуатаційною роботою, Український державний університет залізничного транспорту. ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0001-8963-6467>

E-mail: prokhorov@kart.edu.ua.

Пархоменко Лариса Олексіївна, кандидат технічних наук, доцент кафедри управління експлуатаційною роботою, Український державний університет залізничного транспорту. ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0003-1647-7746>.

E-mail: parhomenko@kart.edu.ua.

Кравченко Михайло Анатолійович, доктор філософії, Кафедра управління експлуатаційною роботою, Український державний університет

APPLICATION OF TIMED PETRI NETS AS THE COMPUTATIONAL CORE OF A DIGITAL TWIN:

залізничного транспорту.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7445-8952>. E-

mail: kravchenko.ma@kart.edu.ua

Калашнікова Тетяна Юрївна, кандидат технічних наук, доцент кафедри управління експлуатаційною роботою, Український державний університет залізничного транспорту. ORCID iD:

<https://orcid.org/0000-0001-6563-5945>.

E-mail: bulavina_tv@ukr.net.

Prokhorov Viktor, Associate Professor, Department of Operational Work Management, Ukrainian State University of Railway Transport. ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0001-8963-6467>. E-mail: prokhorov@kart.edu.ua.

Parkhomenko Larisa, D.Sc. (Tech), Professor, Department of Operational Work Management, Ukrainian State University of Railway Transport. ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0003-1647-7746>. E-mail: parhomenko@kart.edu.ua.

Mykhailo Kravchenko, PhD (Tech), Department of Operations Management, Ukrainian State University of Railway Transport. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7445-8952>. E-mail: kravchenko.ma@kart.edu.ua

Kalashnikova Tetiana, PhD (Tech), Associate Professor, department of operational work management, Ukrainian State University of Railway Transport. ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0001-6563-5945>. E-mail: bulavina_tv@ukr.net.

Стаття надійшла 04.04.26

Стаття прийнята до друку після рецензування 20.04.26

Стаття опублікована (оприлюднена) 29.05.26

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

Редакційн колегія журналу «Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті» в складі:

Головний редактор: Панченко Сергій Володимирович - доктор технічних наук, професор Український державний університет залізничного транспорту

Випусковий редактор – 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 № 06 від 25 травня 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 25.05.2026р. 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.*