

УДК 621.391+621.313.13

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

Границі Крамера-Рао для амплітуди та фази синусоїди, адитивно змішаної з одиночним шумовим імпульсом завади

Синусоїдні електричні коливання широко використовуються в системах передавання інформації, електропостачанні, діагностуванні та інших галузях техніки та науки. Від точності вимірювання параметрів таких коливань залежать якісні характеристики, а інколи і працездатність приладів і систем, в яких їх використовують.

Техніка вимірювання та точнісні характеристики його результатів в умовах спостережень адитивної сигнально-шумової суміші за неперервного в часі характеру шумової завади добре відомі та обґрунтовані теоретично. Технічний бік вимірювання параметрів синусоїдного сигналу, спостереженого на фоні імпульсної завади, розвинено на базі скоріше евристичних підходів. Степінь теоретичного обґрунтування точності отриманих за таких умов оцінок важко назвати прийнятним. У цій роботі на базі статистичної моделі адитивної суміші сигналу та суми імпульсної і неперервної завад, описаної функцією щільності розподілу імовірності, розраховано повний набір елементів відповідної інформаційної матриці Фішера. Визначено границі Крамера-Рао оцінок амплітуди та фази синусоїди відомої частоти за умови її спостереження на фоні вказаних завад. Результати приведені до вигляду, зручного для інженерної практики.

Ключові слова: оцінка амплітуди, оцінка фази, імпульсна завада, матриця Фішера, границя Крамера-Рао.

Вступ

Синусоїдні електричні коливання широко використовують в різних галузях: зв'язок, електропостачання, діагностування та ін. Параметри таких коливань – амплітуда, частота та фаза – несуть корисну для кінцевого споживача інформацію. Зокрема при використанні синусоїдного струму з відомою частотою для контролю технічного стану обмоток статора трифазного асинхронного електродвигуна амплітуда та початкова фаза (надалі – просто «фаза») за відомих параметрів напруги джерела тестового сигналу безпосередньо визначають величини активних і реактивних опорів вказаних обмоток. На результати вимірювання тестового струму чинить вплив низка електромагнітних завад, походження яких притаманне як самому двигуну, так і місцю його встановлення. Дію більшості завад можна нівелювати шляхом раціонального вибору частоти тестового струму. Але короткочасний шумовий імпульс утворює заваду, що впливає на результати вимірювання цього струму в будь-якому придатному діапазоні частот. В результаті цього величини оцінок амплітуди та фази тестового струму мають певний розкид від однієї часової ділянки вимірювань до іншої.

Неточність величини цих оцінок може вийти за межі, які забезпечують надійне визначення електричних параметрів обмоток двигуна, а відтак – призвести до помилки визначення його технічного стану. В умовах, коли зростає насичення середовища потенціальними джерелами імпульсних завад, питання визначення мінімальної досяжної точності вимірювання параметрів тестового струму набуває все більшої актуальності.

Постановка проблеми й аналіз досліджень і публікацій

Важливість синусоїдних коливань для широкого кола технічних застосувань є причиною підвищеної уваги до визначення якомога більш точних числових величин їх параметрів. За наявності завад, викликаних втручанням спотворюючих факторів у спостережені часові залежності досліджуваних коливань, визначені величини є наближеними оцінками фактичних числових значень. Фундаментальною роботою з визначення оцінок параметрів корисних коливань (тобто інформаційних сигналів) в системах зв'язку та в прилеглих галузях є монографія [1].

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

Границя Крамера-Рао є нижньою межею величини дисперсії оцінки, отриманої в рамках певної статистичної моделі спостереженої реалізації коливання. При обмеженні розгляду адитивним впливом завади на синусоїдне коливання до поля зору потрапили публікації, що конкретизують та розширюють фундаментальні результати. По-перше, розроблено процедуру амплітудних і фазових вимірювань для синусоїдного сигналу з поліноміальною зміною фази в часі [2]. Також розроблено процедуру оцінювання фази та затримки сигналів з лінійною частотною модуляцією (такі сигнали є окремим підкласом попередніх) [3]. В обох роботах вважається, що сигнал має постійну амплітуду та спостерігається на фоні неперервного шуму; визначено також границі Крамера-Рао для оцінюваних параметрів; інші варіанти завад не розглянуті. Дещо ширші припущення щодо властивостей синусоїди прийняті в роботі [4]: вважається, що вона зазнала нелінійних спотворень. Розв'язано задачу оцінювання амплітуди, частоти та фази початкового синусоїдного коливання за результатами спостереження спотвореної синусоїди на фоні ширококутового шуму. Цим шумом і обмежується сукупність прийнятих до уваги завад. Особливий випадок дискретної сукупності можливих величин фази сигналу розглянуто в роботі [5], в якій отримано оцінки фази і амплітуди в системах передавання інформації з дискретним фазовим кодуванням при фіксованому сигнальному сузір'ї. Адитивна завада знов-таки вважається неперервною. Задачу статистично обґрунтованого оцінювання амплітуди та фази поширено також на клас трифазних електричних кіл. У роботі [6] цю задачу розв'язано для трифазного кола з розбалансом амплітуд у фазах, а в роботі [7] висвітлено розв'язання проблеми забезпечення високої точності оцінювання, коли вимірювання в трифазному колі дискретизовані за часом за низької частоти взяття відліків. Включена до розгляду в обох роботах завада є неперервною. Питанню обчислювальної ефективності запропонованих або вже використовуваних числових методів оцінювання параметрів синусоїдних та інших коливальних присвячені роботи [8-10]. Методи визначення характеристик результатів вимірювань, виконаних цифровими приладами, унормовані стандартом IEEE 1057-2017 [11]. Обчислені на базі його вимог границі Крамера-Рао наведено в роботі [12] для результатів вимірювання параметрів синусоїдного коливання на фоні білого шуму. Коло класів завад спостереженням синусоїдного інформаційного сигналу розширене шляхом включення до нього короткочасної імпульсної шумової завади [13, 14]. В цих роботах розроблено методологію оцінювання амплітуди та фази синусоїдного сигналу, який спостерігається на фоні суми неперервного білого шуму та одиночної імпульсної завади. Питання граничної точності

оцінювання, втім, не знайшло свого висвітлення в цих роботах.

Отже, в опублікованих на сьогодні джерелах всебічно розглянуті теоретичні та прикладні аспекти оцінювання параметрів синусоїдного коливання і визначення точності отриманих оцінок за результатами спостережень, зроблених в умовах дії неперервної завади. Певні доробки наявні й в питанні обчислення таких оцінок з урахуванням дії імпульсних завад. Однак не вдалося виявити публікацій, в яких було б надано співвідношення для визначення потенційно досяжної точності оцінок параметрів синусоїдного коливання, спотвореного дією короткочасної імпульсної завади. Знаходження таких співвідношень дало б змогу визначити об'єктивні межі технічних можливостей систем передавання інформації та досяжної точності вимірювальних пристроїв.

Мета та завдання дослідження

Мета дослідження – отримання математично обґрунтованих виразів для найвищої досяжної точності оцінок амплітуди та початкової фази синусоїдного коливання відомої частоти, адитивно змішаного з короткочасною одиночною імпульсною завадою та неперервним гаусівським шумом, які мають довільні потужності. Для досягнення поставленої мети було розв'язано дві задачі:

- 1) розрахунок інформаційної матриці Фішера для функції правдоподібності, відповідної до вказаної спостереженої суміші сигналу та завад;
- 2) визначення виразів для границь Крамера-Рао оцінок амплітуди та початкової фази синусоїди, отриманих за критерієм максимуму правдоподібності в описаних вище завадових умовах.

Основна частина

Розрахунок інформаційної матриці Фішера стосовно до описаних умов спостережень

Вихідна ситуація, в якій необхідно отримати оцінки амплітуди та початкової фази синусоїди та знайти границі Крамера-Рао для отриманих оцінок, є такою. На інтервалі часу $[T_1, T_2]$ існує синусоїда з невідомими амплітудою I_{ms} і початковою фазою φ_s та відомою частотою ω . На всьому протязі цього інтервалу адитивно до синусоїди діє неперервний шумовий гаусівський стаціонарний випадковий процес із спектральною густиною потужності величиною $0,5N_0$, рівномірною в інтервалі частот $[-F_p, F_p]$ і величиною 0 поза цим інтервалом. Всередині вказаного інтервалу часу на проміжку $[T_1 + \tau_x, T_1 + \tau_x + \tau_p]$ також адитивно діє

імпульс у вигляді фрагменту гаусівського стаціонарного випадкового процесу зі спектральною густиною потужності $0,5N_p$, рівномірною в тому ж інтервалі частот і величиною 0 поза цим інтервалом. Як показано в роботі [13], умовну щільність ймовірності реалізації струму i , спостережену на інтервалі $[T_1, T_2]$, описує вираз

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

де $i(t)$ – залежність спостереженого коливання від часу;

$$\Phi(t, \tau_x, \tau_p) = \begin{cases} 1 + \frac{N_p}{N_0}, & t \in [T_1 + \tau_x, T_1 + \tau_x + \tau_p] \\ 1 & \text{при інших } t. \end{cases} \quad (2)$$

Вважатимемо, що величини T_1, T_2, τ_x, τ_p відомі.

Виходячи з виразу (1) шукатимемо дисперсії σ_I^2 та σ_φ^2 оцінок $\hat{I}_{ms}$ та $\hat{\varphi}_s$ відповідно амплітуди та початкової фази струму. Ці дисперсії є діагональними елементами коваріаційної матриці $\tilde{\mathbf{K}}$. У свою чергу, ця матриця пов'язана з інформаційною матрицею Фішера $\tilde{\Phi}$ матричною нерівністю

$$\tilde{\mathbf{K}} \geq \tilde{\Phi}^{-1}. \quad (3)$$

Елементи інформаційної матриці Фішера мають вигляд

$$\Phi_{ij} = -E \left\{ \frac{\partial^2}{\partial \lambda_i \cdot \partial \lambda_j} \ln p(u|\tilde{\lambda}) \middle| \tilde{\lambda} \right\}. \quad (4)$$

Тут $E\{\dots\}$ позначає операцію математичного очікування по вектору параметрів $\tilde{\lambda} = (\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_M)^T$, « T » позначає матричне

транспонування; u позначає спостережену реалізацію випадкового процесу.

Щодо нашої ситуації $\tilde{\lambda} = (I_{ms}, \varphi_s)^T$. Множник перед експонентою у формулі (1) не залежить від $\tilde{\lambda}$; позначимо його C . Введемо також позначення

$$u(t) = \frac{i(t)}{\sqrt{\Phi(t, \tau_x, \tau_p)}}, \quad (5)$$

$$s(t, \tilde{\lambda}) = \frac{I_{ms} \sin(\omega t + \varphi_s)}{\sqrt{\Phi(t, \tau_x, \tau_p)}}. \quad (6)$$

З урахуванням прийнятих позначень вираз (1) набуде вигляду

$$p(u|\tilde{\lambda}, \tau_x, \tau_p) = C \cdot \exp \left\{ -\frac{1}{N_0} \int_{T_1}^{T_2} [u(t) - s(t, \tilde{\lambda})]^2 dt \right\}. \quad (7)$$

Підставивши цей вираз у (4) і врахувавши, що

$E\{u(t)\} = s(t, \tilde{\lambda})$, отримаємо, що

$$\Phi_{ij} = \frac{2}{N_0} \int_{T_1}^{T_2} \frac{\partial s(t, \tilde{\lambda})}{\partial \lambda_i} \cdot \frac{\partial s(t, \tilde{\lambda})}{\partial \lambda_j} dt. \quad (8)$$

Введемо позначення $\lambda_1 = I_{ms}$, $\lambda_2 = \varphi_s$. Тоді елементи інформаційної матриці Фішера при $\omega \gg 1$ визначатимуться такими виразами:

$$\Phi_{11} = \Phi_{II} = \frac{2}{N_0} \int_{T_1}^{T_2} \left[\frac{\partial s(t, \tilde{\lambda})}{\partial I_{ms}} \right]^2 dt = \frac{2}{N_0} \int_{T_1}^{T_2} \left[\frac{\sin^2(\omega t + \varphi_s)}{\Phi(t, \tau_x, \tau_p)} \right] dt \approx \\ \approx \frac{T_2 - T_1 - \tau_p}{N_0} + \frac{\tau_p}{N_0 + N_p}; \quad (9)$$

$$\Phi_{12} = \Phi_{I\varphi} = \Phi_{21} = \Phi_{\varphi I} \approx 0; \quad (10)$$

$$\Phi_{22} = \Phi_{\varphi\varphi} = \frac{2}{N_0} \int_{T_1}^{T_2} \frac{1}{\Phi(t, \tau_x, \tau_p)} \cdot \left\{ \frac{\partial}{\partial \varphi_s} [I_{ms} \sin(\omega t + \varphi_s)] \right\}^2 dt \approx \underset{N_p \gg N_0}{\approx} \sqrt{\frac{N_0}{T_2 - T_1 - \tau_p}}, \quad (16)$$

$$\approx I_{ms}^2 \cdot \left(\frac{T_2 - T_1 - \tau_p}{N_0} + \frac{\tau_p}{N_0 + N_p} \right). \quad (11)$$

Отже, інформаційна матриця Фішера є такою:

$$\vec{\Phi} = \begin{pmatrix} \frac{T_2 - T_1 - \tau_p}{N_0} + \frac{\tau_p}{N_0 + N_p} & 0 \\ 0 & I_{ms}^2 \cdot \left(\frac{T_2 - T_1 - \tau_p}{N_0} + \frac{\tau_p}{N_0 + N_p} \right) \end{pmatrix}. \quad (12)$$

Визначення виразів для границь Крамера-Рао

Отримана матриця (12) є діагональною. Зворотна їй матриця також є діагональною, тому з урахуванням нерівності (3) отримуємо, що

$$\vec{K} \geq \begin{pmatrix} \left(\frac{T_2 - T_1 - \tau_p}{N_0} + \frac{\tau_p}{N_0 + N_p} \right)^{-1} & 0 \\ 0 & I_{ms}^{-2} \cdot \left(\frac{T_2 - T_1 - \tau_p}{N_0} + \frac{\tau_p}{N_0 + N_p} \right)^{-1} \end{pmatrix}. \quad (13)$$

При $N_p \gg N_0$ маємо нерівність

$$\vec{K} \geq \begin{pmatrix} \frac{N_0}{T_2 - T_1 - \tau_p} & 0 \\ 0 & \frac{N_0}{I_{ms}^2 \cdot (T_2 - T_1 - \tau_p)} \end{pmatrix}. \quad (14)$$

З цих матричних нерівностей дістаємо границі Крамера-Рао як мінімальні величини дисперсій параметрів, тобто діагональні елементи. Відповідні мінімальні середньоквадратичні відхилення оцінок складають

$$\sigma_{I_{ms} \min} = \frac{1}{\sqrt{\frac{T_2 - T_1 - \tau_p}{N_0} + \frac{\tau_p}{N_0 + N_p}}} \underset{N_p \gg N_0}{\approx} \quad (15)$$

$$\sigma_{\varphi_{\min}} = \frac{1}{I_{ms} \cdot \sqrt{\frac{T_2 - T_1 - \tau_p}{N_0} + \frac{\tau_p}{N_0 + N_p}}} \underset{N_p \gg N_0}{\approx} \quad (17)$$

$$\underset{N_p \gg N_0}{\approx} \frac{1}{I_{ms}} \sqrt{\frac{N_0}{T_2 - T_1 - \tau_p}}. \quad (18)$$

Перетворимо вирази (15) та (17) до вигляду, зручного при візуальному спостереженні процесів на екрані осцилографа. Для цього введемо ширину ΔF смуги пропускання пристрою оцінювання параметрів. У виразі (15) помножимо чисельники і знаменники підкорінних дробів на $18\Delta F$. Отримаємо, що

$$\sigma_{I_{ms} \min} = \frac{1}{\sqrt{18\Delta F \left[\frac{T_2 - T_1 - \tau_p}{18N_0\Delta F} + \frac{\tau_p}{18(N_0 + N_p)\Delta F} \right]}} \quad (19)$$

Оскільки $2N_0 \cdot \Delta F = \sigma_0^2$ (дисперсія неперервного шуму), то $18N_0 \cdot \Delta F = (3\sigma_0)^2 = I_{n0,5}^2$, де

$$I_{n0,5} = 3\sigma_0 \quad (20)$$

є напівшириною шумової «доріжки» на екрані осцилографа.

Аналогічно $18N_p \cdot \Delta F = (3\sigma_p)^2 = I_p^2$, де

$$I_p = 3\sigma_p \quad (21)$$

є умовною амплітудою шумової імпульсної завади. Отже, можна записати, що

$$\sigma_{I_{ms} \min} = \frac{1}{3 \cdot \sqrt{\frac{2\Delta F(T_2 - T_1 - \tau_p)}{I_{n0,5}^2} + \frac{2\Delta F\tau_p}{I_{n0,5}^2 + I_p^2}}} \quad (22)$$

Аналогічно

$$\sigma_{\varphi \min} = \frac{1}{3I_{ms} \cdot \sqrt{\frac{2\Delta F(T_2 - T_1 - \tau_p)}{I_{n0,5}^2} + \frac{2\Delta F\tau_p}{I_{n0,5}^2 + I_p^2}}} \quad (23)$$

величини амплітуди струму в формулу (23) можна підставити її оцінку, обчислену у такий спосіб, як у роботі [13].

На рис. 1 і 2 наведено результати обчислення залежностей МСВ оцінок відповідно амплітуди та фази від I_p при $I_{ms}=0,1$ А; $I_{n0,5}=0,02$ А;

$T_2 - T_1 = 0,01$ с; $\Delta F = 16$ кГц і трьох величин протяжності імпульсу. Крива 1 відповідає

$\tau_p = 0,1(T_2 - T_1)$, крива 2 –

$\tau_p = 0,5(T_2 - T_1)$, крива 3 –

$\tau_p = 0,75(T_2 - T_1)$.

Для обчислення величини мінімального середньоквадратичного відхилення (МСВ) у ході експериментальних досліджень замість точної

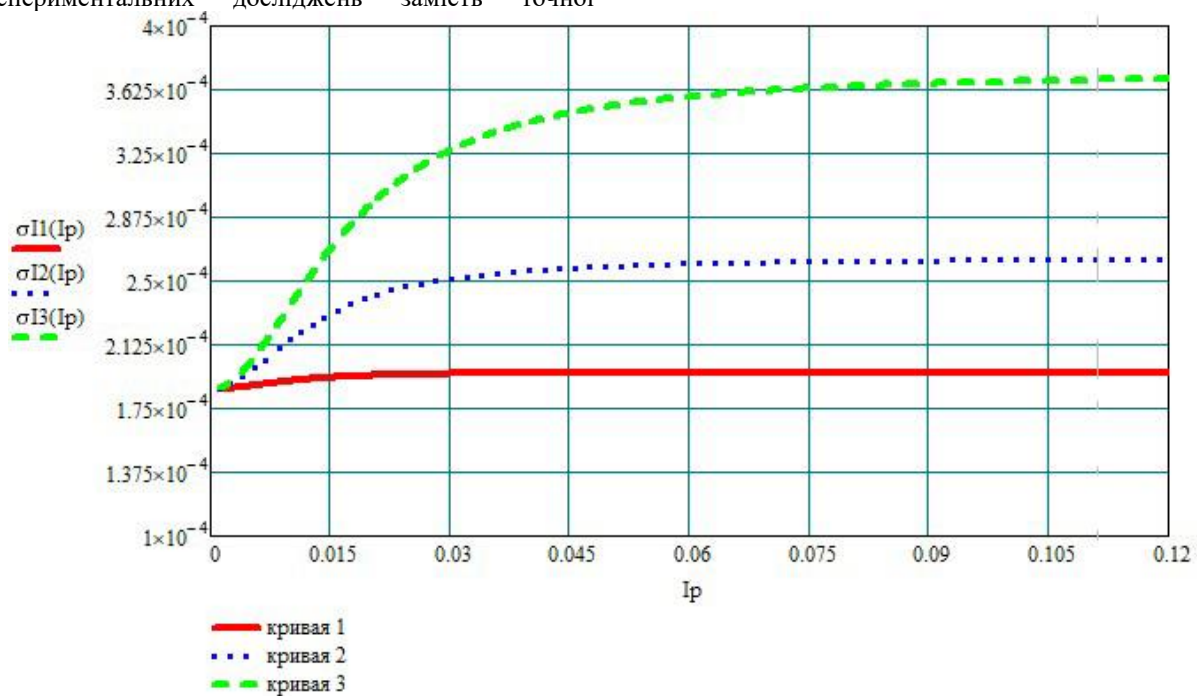


Рис. 1. Залежність мінімального середньоквадратичного відхилення оцінки амплітуди синусоїди від амплітуди імпульсу завади

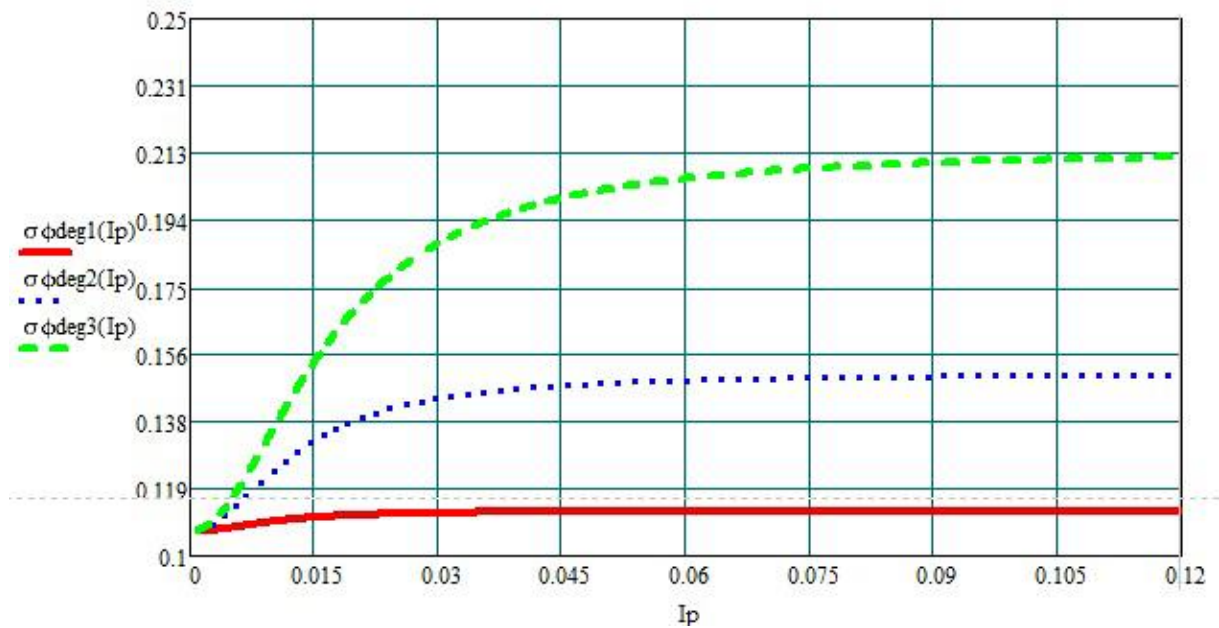


Рис. 2. Залежність мінімального середньоквадратичного відхилення оцінки початкової фази синусоїди від амплітуди імпульсу завади

Стабілізація величин МСВ при зростанні амплітуд імпульсу обумовлена зростанням за цих умов бланкуючої дії знаменника виразу (1), з причини чого уражена імпульсом ділянка сигнально-завадової реалізації робить все менший внесок у формування оцінок. Згідно з виразами (22) та (23) при великих величинах амплітуди імпульсу величини МСВ майже цілком визначаються стаціонарним шумом.

На рис. 3 наведено графік залежності МСВ оцінки амплітуди від ΔF при $I_{n0,5}=10^{-3}$ А; $I_p=1$ А;

$T_2 - T_1 = 0,01$ с; $\tau_p = 0,5(T_2 - T_1)$. На рис. 4 наведено графіки залежності МСВ оцінки фази від ΔF за тих самих початкових даних. Крива 1 відповідає $I_{ms}=0,01$ А, крива 2 – $I_{ms}=0,05$ А, крива 3 – $I_{ms}=0,1$ А.

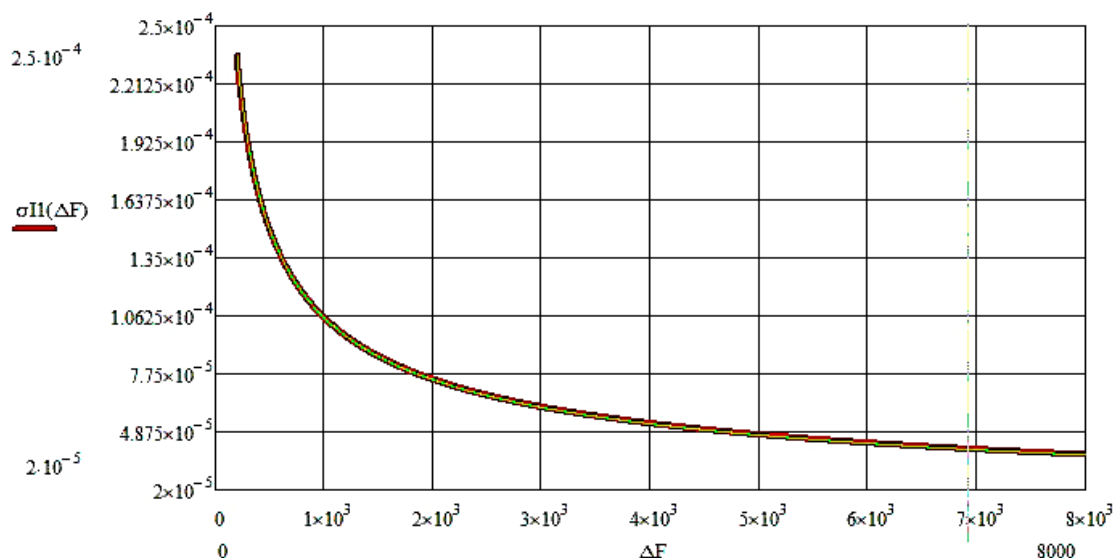


Рис. 3. Залежність мінімального середньоквадратичного відхилення оцінки амплітуди синусоїди від ширини смуги пропускання оцінювача

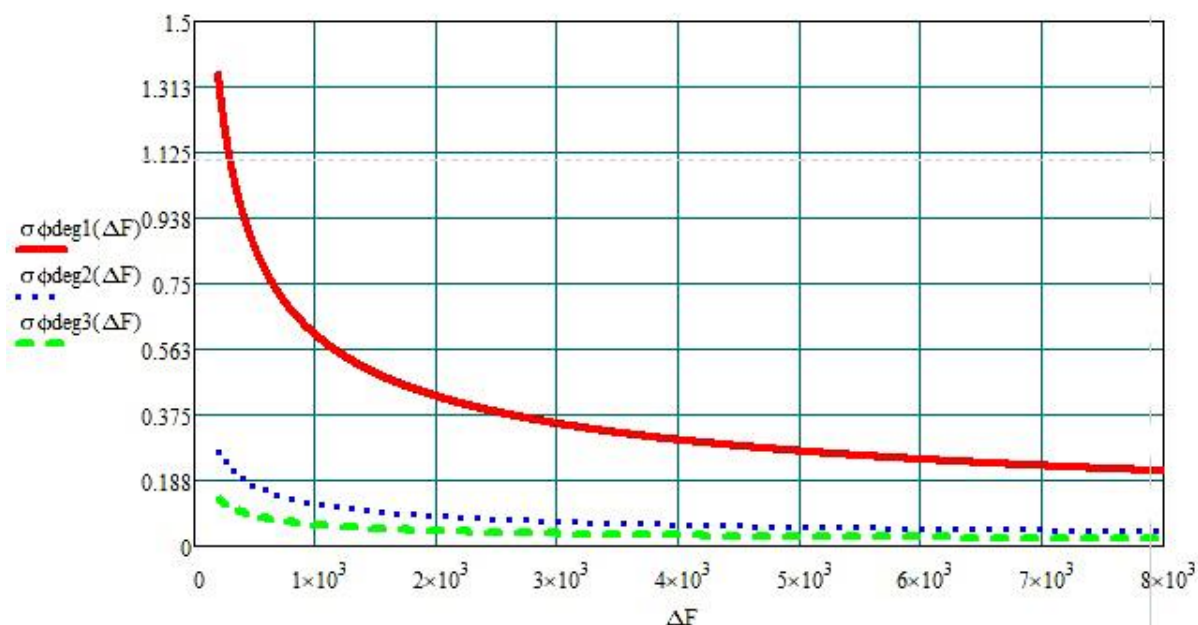


Рис. 4. Залежність мінімального середньоквадратичного відхилення оцінки початкової фази синусоїди від ширини смуги пропускання оцінювача

Зменшення величин МСВ із зростанням величини ΔF при сталих I_p та $I_{n0,5}$ пояснюється відповідним до формул (20) і (21) зменшенням спектральних густин потужності обох завад.

Висновки

Розглянуте питання відноситься до методології визначення параметрів інформаційних сигналів в системах передавання інформації, електропостачанні, діагностиці пристроїв і суміжних галузях. В якості відправних даних використано статистичну модель адитивної суміші сигналу та завад, описану функцією щільності розподілу ймовірності миттєвого значення. Такий підхід забезпечив можливість визначення виразів для найвищої досяжної точності оцінок параметрів через проміжний етап визначення повної сукупності елементів інформаційної матриці Фішера. В результаті обернення цієї матриці визначено нижні границі дисперсій оцінок параметрів (Границі Крамера-Рао) дослідженої моделі. У цій роботі такі границі знайдено для оцінок параметрів синусоїдного сигналу, отриманих в досі залишених поза увагою умовах дії короткочасної імпульсної завади. Отже, результати цієї роботи розширюють коло класів завад, дія яких піддається кількісному врахуванню. Це дасть змогу додатково об'єктивізувати визначення граничних технічних можливостей як нових, так і сучасних систем і пристроїв, що використовують синусоїдні інформаційні сигнали. Отримані найвищі граничні точності оцінок є абсолютними, оскільки вони розраховані за всіх відомих параметрів (крім

інформаційних) функції щільності розподілу ймовірності спостереженої реалізації вхідного колювання. Врахування апіорної невизначеності неінформаційних параметрів цієї функції є завданням наступних досліджень.

Список використаних джерел

1. Van Trees H. L. Detection, Estimation and Modulation Theory, Part I: Detection, Estimation and Linear Modulation Theory: Wiley & Sons, Inc. 2001, 686 p. URL : DOI: 10.1002/0471221082.
2. McKilliam R., Pollok A. On the Cramér-Rao bound for polynomial phase signals. *Signal Processing*. Vol. 95. February, 2014. P. 27-31. URL : <https://doi.org/10.1016/j.sigpro.2013.08.007>.
3. Vilnrotter V., Breidenthal J. Maximum Likelihood Estimation of Delay and Phase for Chirped Signals. *IPN Progress Report*. 42-215 B. November 15, 2018. P. 1-17. URL : https://ipnpr.jpl.gov/progress_report/42-215_B.pdf.
4. Belega D., Petri D. Fast procedure for accurate parameter estimation of sine-waves affected by noise and harmonic distortion. *Digital Signal Processing*. Vol.114, July 2021. P. 103035. URL : <https://doi.org/10.1016/j.dsp.2021.103035>.
5. McKilliam R. et al. Carrier Phase and Amplitude Estimation for Phase Shift Keying Using Pilots and Data / McKilliam R., Pollok A., Cowley W., Vaughan L., Quinn B. *IEEE Transactions on Signal Processing*. Vol. 62. Issue

15. August 2014. P. 3976-3989. URL : DOI: 10.1109/ TSP.2014. 2332976.
6. Choqueuse V., Belouchrani A., El Houssin B., Benbouzid M. Estimation of amplitude, phase and unbalance parameters in three phase systems: analytical solutions, efficient implementation and performance analysis. *IEEE Transactions on Signal Processing*. Vol. 62. Issue 16. 2014. P. 4064-4076. URL : DOI: 10.1109/ TSP.2014. 2333565. hal-01058109.
7. Abusorrah A. M., Sepahvand H. A. Frequency/ Phase/ Amplitude Estimator for Three-Phase Applications Operating at a Low Sampling Rate. *Mathematics*. 2024. № 12. P. 363. URL : <https://doi.org/10.3390/math 12030363>.
8. Chen D., Su X., Shen T., Mou L. A Parameter Estimation Algorithm for Damped Real-value Sinusoid in Noise. *Measurement Science Reviev*. Vol. 23. № 3. 2023. P. 99-105. URL : <https://doi.org/10.2478/msr-2023-0013>.
9. Литвин-Попович А. И. Обнаружение сигналов и измерение их параметров в следящих радиотехнических системах. *Технологический аудит и резервы производства*. № 6/1 (14), 2013. С. 30-34. URL : <https://doi.org/10.15587/2312-8372.2013.19560>.
10. Kokalj M., Lindič M., Voljč B. Pinter B., Svetik Z., Lapuh R. High accuracy signal parameter estimation algorithm for calibration of PMU devices. 2012 *Conference on Precision Electromagnetic Measurements, Washington, DC, USA*. 2012. P. 288-289. URL : <https://doi:10.1109/CPEM.2012.6250915>.
11. IEEE Standard for Digitizing Waveform Recorders. URL : standards.ieee.org/ieee/1057/5945.
12. Andersson T., Handel P. IEEE Standard 1057, Cramér-Rao bound and the parsimony principle. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*. 2006. Vol. 55. № 1. P. 44-53. URL : doi:10.1109/TIM.2005.861497.
13. Ананьєва О. М., Бабаєв М. М., Давиденко М. Г., Панченко В. В. Оцінювання параметрів неперервного зонduючого сигналу при тестуванні обмотки статора трифазного асинхронного двигуна. *Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті*. 2024. № 2. С. 52-60. URL : <https://doi.org/10.18664/iksz.v29i2. 307682>.
14. Ананьєва О. М., Бабаєв М. М., Давиденко М. Г., Панченко В. В. Синтез пристрою оцінювання параметрів синусоїдного сигналу, адитивно змішаного з одиночною імпульсною завадою. *Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті*. 2024. № 3. С. 25-32. URL : <https://doi.org/10.18664/iksz.v29i3. 313625>.

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

The Cramer-Rao bounds for the amplitude and phase of a sine wave additively mixed with a single interference noise pulse

Abstract. Sinusoidal electrical oscillations are widely used in information transmission systems, power supply, diagnostics and other branches of technology and science. The quality characteristics, and sometimes the performance of devices and systems in which they are used, depend on the accuracy of measuring the parameters of such oscillations.

The measurement technique and the accuracy characteristics of its results in conditions of observations of an additive signal-noise blend with a continuous nature of noise interference in time are well known and theoretically justified.

The technical side of measuring the parameters of a sinusoidal signal observed against a background of impulse noise has been developed on the basis of rather heuristic approaches. The degree of theoretical justification for the accuracy of estimates obtained under such conditions can hardly be considered acceptable. In this work, based on the statistical model of the additive blend of the signal and the sum of impulse and continuous noise, described by the probability density function, the full set of elements of the corresponding Fisher information matrix has been calculated. Mathematically justified expressions for the highest achievable accuracy of estimates of the amplitude and initial phase of a sinusoidal oscillation of a known frequency, additively mixed with short-term single impulse noise and continuous Gaussian noise, which have arbitrary powers, are obtained. The Cramér-Rao bounds of the amplitude and phase estimates of a sinusoid of known frequency are determined, provided that it is observed against the background of the specified interference. The results are presented in a form convenient for engineering practice.

Key words: amplitude estimate, phase estimate, pulse interference, Fisher matrix, Cramér-Rao bound.

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

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

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

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

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

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

Mykhailo Babaiev, Doctor of Technical Sciences, Professor, Department of Electric Power Engineering,

Electrical Engineering and Electromechanics, Ukrainian State University of Railway Transport, Kharkiv, Ukraine. E-mail: mmbxiit@gmail.com. ID ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3553-8786>.

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

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

КАРГІН А.О., д.т.н, професор

(Український державний університет залізничного транспорту)

ТОРГОНСЬКИЙ А.В., PhD студент

(Український державний університет залізничного транспорту)

Щодо можливостей застосування штучного інтелекту для створення баз даних

Інформаційна технологія створення баз знань є частиною системи керування знаннями, яка дозволяє автоматизувати процеси збору, аналізу та управління знаннями. Ця технологія використовує сервіси штучного інтелекту (ШІ) для вибору релевантної інформації та її інтеграції в базу знань. Дослідження та розвиток технології ШІ з метою автоматизації створення баз даних є актуальним, так як спектр завдань що пов'язані зі створенням баз даних швидко поширюється у різних галузях. В роботі запропоновано метод переходу від традиційних способів збору даних до автоматизованих методів на основі ШІ. Проведено серію експериментів, з створення, нормалізації та наповнювання інформацією баз даних. Наведені результати порівняння трьох моделей штучного інтелекту з точки зору здатності створювати базу даних, нормалізувати її, знайти та заповнити базу даних, а також швидкість виконання запитів.

Ключові слова: бази даних, система керування знаннями, сервіси штучного інтелекту.

Вступ

Штучний інтелект (ШІ) швидко інтегрується в різні сфери діяльності, змінюючи їхні структури та функціональні можливості завдяки своїм здатностям аналізувати дані, автоматизувати процеси та приймати рішення. Від охорони здоров'я до державного управління, ШІ демонструє значний потенціал у підвищенні ефективності, точності та персоналізації послуг. У медичній сфері ШІ використовується для діагностики захворювань, персоналізованої медицини та роботизованої хірургії, що сприяє підвищенню рівня медичної допомоги та зниженню ризиків для пацієнтів [1]. В рітейлі та електронній комерції ШІ допомагає створювати персоналізовані рекомендації, оптимізувати управління запасами та підтримувати клієнтів за допомогою чат-ботів [2]. У сфері логістики та транспорту ШІ оптимізує маршрути, забезпечує безпеку безпілотних транспортних засобів та прогнозує попит [3].

Маркетингова індустрія використовує ШІ для аналізу даних, створення персоналізованого контенту та оптимізації рекламних кампаній [4]. У виробництві ШІ сприяє прогнозному обслуговуванню, автоматизації процесів та контролю якості, що підвищує продуктивність і знижує витрати [5].

В освіті системи ШІ адаптують навчальні матеріали до потреб студентів, автоматизують оцінювання та забезпечують додаткову підтримку через віртуальних репетиторів [6]. У сфері розваг ШІ використовується для рекомендацій медіа-контенту, створення нового контенту та розвитку інтелектуальних ігор [7]. Нарешті, державне управління застосовує ШІ для аналізу даних, забезпечення безпеки та автоматизації адміністративних процесів, підвищуючи ефективність державних служб [8]. Сучасні роботи як універсальні машини, включаючи всі види автономних безпілотних машин [9], призначені для надання різноманітних послуг за допомогою ШІ. Щоб подолати проблему налаштування роботів на певні послуги, які зазвичай досягаються шляхом навчання, і консолідувати зусилля роботизованих лабораторій по всьому світу, було запущено проєкт RT-X [10]. Мета проєкту — створити загальний робототехнічний мозок (General Robots Brain, GBR) шляхом збору даних, ресурсів і коду, що стосується навичок, яким роботи вже навчені [11]. GenAI відіграє провідну роль, так як збір й створення знань про семантичні зв'язки між об'єктами в оточенні роботів покладають на AI.

Зважаючи на широкий спектр завдань у різних галузях що пов'язані зі створенням та підтримкою баз даних є актуальним дослідження та розвиток технології ШІ з метою автоматизації створення баз даних [12-14].

Основна мета даної статті – аналіз можливостей застосування технологій ШІ для автоматизації процесів створення баз даних, визначення їх переваг, а також розробка методу створення баз знань за допомогою ШІ.

Обговорення проблеми

Для пояснення основних мотивів створення баз даних, а саме – технологія створення баз знань за допомогою сервісів штучного інтелекту, можна розглянути просту задачу з створення бази даних, та її наповнення, з тривалістю життя у різних регіонах планети.

Процес проектування та створення баз даних (БД) на сьогоднішній день є складним і багатоступеневим, вимагаючи використання сучасних методів, інструментів та технологій. Основні етапи цього процесу включають [15]:

1) Збір вимог. На початковому етапі визначаються вимоги користувачів та бізнесу до БД. Це включає проведення інтерв'ю з користувачами, аналіз бізнес-процесів та документів, а також чітке формулювання цілей і задач, які повинна вирішувати БД. 2) Концептуальне проектування. Створюються ER-діаграми (Entity-Relationship diagrams), що відображають об'єкти (сутності) та їх взаємозв'язки, а також визначаються властивості кожної сутності та взаємозв'язків між ними. 3) Логічне проектування. На цьому етапі відбувається нормалізація даних для усунення надлишковості та забезпечення цілісності даних. Логічне моделювання бази даних включає створення схем таблиць, первинних і зовнішніх ключів. 4) Фізичне проектування. Вибір системи управління базами даних (СУБД), наприклад, MySQL, PostgreSQL, Oracle або Microsoft SQL Server, є ключовим аспектом фізичного проектування. Крім того, здійснюється оптимізація фізичної структури БД для забезпечення ефективності та швидкодії, налаштовуються індекси, визначаються партиції та інші параметри. 5) Впровадження та тестування. На цьому етапі відбувається міграція існуючих даних у нову БД, якщо це необхідно. Перевірка БД на наявність помилок та відповідність вимогам включає функціональне тестування, тестування продуктивності та безпеки. 6) Експлуатація та підтримка. Постійний моніторинг продуктивності та безпеки БД, а також регулярне обслуговування, включаючи резервне копіювання, оновлення та оптимізацію БД, є важливими аспектами цього етапу. Також забезпечується безпека даних через аудит доступу та управління правами користувачів.

Проектування бази даних є складним і багатогранним процесом, під час якого можна зіткнутися з багатьма проблемами. Незрозумілі або

неповні вимоги від користувачів можуть призвести до проектування бази даних, яка не відповідає реальним потребам, або з часом вимоги користувача можуть змінюватись. Погана нормалізація, надмірна нормалізація ускладнює запити і знижує продуктивність через численні з'єднання, низька нормалізація призводить до надмірності даних та аномалій при оновленні. Неправильне визначення сутностей, їх атрибутів і зв'язків між ними може спричинити серйозні проблеми в майбутньому. Зважаючи на усі ці обставини, помилка може коштувати дуже багато часу, і в залежності від того на якому етапі виникла помилка тим більше часу потрібно на її виправлення. Не зважаючи вже на те що інколи помилки можуть бути настільки критичними, а бо вимоги можуть змінитись настільки що простіше перепроєктувати базу даних з нуля чим виправляти те що є.

Технологія створення баз знань за допомогою сервісів штучного інтелекту. Виконавши аналіз вищезазначених підходів, і врахувавши їх недоліки можна створювати бази даних, а саме метод створення баз знань за допомогою сервісів штучного інтелекту [12, 15-17].

Це означає створити технологію яка зможе автоматично виконувати певні етапи проектування бази даних, виконати концептуальне проектування бази даних, де вирішить які об'єкти будуть створенні, та які зв'язки будуть між цими об'єктами. Логічне проектування, де буде виконана нормалізація бази даних, фізичне проектування де буде написано SQL запит на створення таблиць, впровадження цієї бази, та експлуатація – система зможе сама оновлювати дані, а також переробляти структуру таблиць при необхідності [18].

Необхідно дослідити сучасні системи штучного інтелекту на здатність розуміти запити, змогу створювати SQL запит на створення бази даних та таблиць до цієї бази даних, а також здатність існуючих систем ШІ знаходити інформацію та заповнювати таблиці у базі даних.

Для вирішення задачі пропонується дослідити такі системи штучного інтелекту як Chagt GPT 3.5, Microsoft Copilot (Microsoft Bing Chat), Opera Aria [12, 17]. Пропонується створити базу даних з заздалегідь відомими полями, це буде база даних у якій буде зберігатись середня тривалість життя людини у різних країнах. Критеріями оцінки буде: здатність ШІ створювати базу даних та таблиці до цієї бази даних, здатність ШІ нормалізувати базу даних, та наповнення інформацією бази даних, час виконання запитів, кількість додаткових запитів та

наявність API (Application Programming Interface). Для прозорого результату запити до штучного інтелекту будуть ставитись однакові. Запити які

будуть задані III поділені на 3 частини: Створення бази даних, нормалізація бази даних, та заповнення бази даних. Усі результати тестів зведені у таблиці 1.

Таблиця 1. – Результати тестування III

	ChatGPT 3.5	Opera Aria	Microsoft Copilot
Створення бази даних таблиць	+	+	+
Нормалізація 1NF	+	+	+
Нормалізація 2NF	-/+	-/+	+/-
Нормалізація 3NF	+	+	+
Час виконання запитів	~ 3 секунд	~1.5 хвилини	~3 хвилин
Додаткові запити	1	3	1
Наявність API	+	-	-

Експерименти із виявлення здатності створювати бази даних сучасних за допомогою III. Розглянемо систему штучного інтелекту ChatGPT 3.5 на здатність створювати бази даних. Для цього почнемо зі створення бази даних. Поставимо системі III запит: «Створи базу даних на мові T-SQL з полями: унікальне поле, країна, стать, рік, середня тривалість життя». III ChatGPT 3.5 впорався з цією задачею, та написав SQL-запит на мові T-SQL з цією базою даних, який можна побачити на рисунку 1.

```
-- Створення бази даних
CREATE DATABASE LifeExpectancyDB;
GO
-- Використання новоствореної бази даних
USE LifeExpectancyDB;
GO
-- Створення таблиці LifeExpectancy
CREATE TABLE LifeExpectancy (
    ID INT PRIMARY KEY IDENTITY(1,1), --
    Country NVARCHAR(100) NOT NULL, --
    Gender NVARCHAR(10) NOT NULL, --
    Year INT NOT NULL, --
    LifeExpectancy FLOAT NOT NULL --
);
GO
```

Рисунок 1. – Створення бази даних III «ChatGPT 3.5»

Також з III ChatGPT 3.5 надав опис полів, на рисунку 2.

- ID: Унікальне поле (індекс), яке автоматично збільшується при додаванні нових записів.
- Country: Поле для зберігання назви країни, тип NVARCHAR(100) дозволяє зберігати до 100 символів, включаючи юнікодні символи.
- Gender: Поле для зберігання статі, тип NVARCHAR(10) дозволяє зберігати до 10 символів.
- Year: Поле для зберігання року, тип INT.
- LifeExpectancy: Поле для зберігання середньої тривалості життя, тип FLOAT.

Рисунок 2. – Опис полів у базі даних сгенерованій III «ChatGPT 3.5»

Наступним кроком була нормалізація бази даних. На запит: «Нормалізуй створену базу даних » був результат відпрацювання запиту на рисунку 3.

```
CREATE TABLE Countries (
    CountryID INT PRIMARY KEY IDENTITY(1,1),
    CountryName NVARCHAR(50) NOT NULL
);
```

```
CREATE TABLE Genders (
    GenderID INT PRIMARY KEY IDENTITY(1,1),
    GenderName NVARCHAR(10) NOT NULL
);
```

```
CREATE TABLE People (
    ID INT PRIMARY KEY IDENTITY(1,1),
    CountryID INT NOT NULL,
    GenderID INT NOT NULL,
    Year INT NOT NULL,
    LifeExpectancy FLOAT NOT NULL,
    FOREIGN KEY (CountryID) REFERENCES
    Countries(CountryID),
```

```
FOREIGN KEY (GenderID) REFERENCES
Genders(GenderID)
);
```

Рисунок 3. – Часткова нормалізація бази даних виконаний III «ChatGPT 3.5»

ChatGPT виконав запит на нормалізацію бази даних частково. Він зміг винести в окремі таблиці поля Country та Gender, але залишив поле Year у базі, що є помилкою. Після вказівки на цю помилку запитом «Поле Year теж можна винести у окрему таблицю», ChatGPT 3.5 повністю нормалізував базу даних і написав SQL-запит на створення такої бази даних на рисунку 4.

```
-- Створення бази даних
CREATE DATABASE LifeExpectancyDB;
GO
-- Використання новоствореної бази даних
USE LifeExpectancyDB;
GO
-- Створення таблиці країн
CREATE TABLE Country (
    CountryID INT PRIMARY KEY IDENTITY(1,1), --
    Унікальний ідентифікатор країни
    CountryName NVARCHAR(100) NOT NULL --
    Назва країни
);
GO
-- Створення таблиці статей
CREATE TABLE Gender (
    GenderID INT PRIMARY KEY IDENTITY(1,1), --
    Унікальний ідентифікатор статі
    GenderName NVARCHAR(10) NOT NULL --
    Назва статі (наприклад, "Чоловік", "Жінка")
);
GO
-- Створення таблиці років
CREATE TABLE Year (
    YearID INT PRIMARY KEY IDENTITY(1,1), --
    Унікальний ідентифікатор року
    YearValue INT NOT NULL -- Значення
    року
);
GO
-- Створення таблиці тривалості життя
CREATE TABLE LifeExpectancy (
    LifeExpectancyID INT PRIMARY KEY
    IDENTITY(1,1), -- Унікальне поле з автоматичним
    інкрементом
    CountryID INT NOT NULL, --
    Зовнішній ключ на таблицю Country
    GenderID INT NOT NULL, --
    Зовнішній ключ на таблицю Gender
```

```
YearID INT NOT NULL, --
Зовнішній ключ на таблицю Year
LifeExpectancy FLOAT NOT NULL, --
Середня тривалість життя
FOREIGN KEY (CountryID) REFERENCES
Country(CountryID),
FOREIGN KEY (GenderID) REFERENCES
Gender(GenderID),
FOREIGN KEY (YearID) REFERENCES
Year(YearID)
);
GO
```

Рисунок 4. – Повна нормалізація бази даних виконана III «ChatGPT 3.5»

Тепер база даних повністю нормалізована, наступна спроба була змусити систему III ChatGPT 3.5 знайти будь-яку інформацію та перетворити цю інформацію на SQL запит, який заповнить цю базу даних. Для цього виконано запит: «Найди дані для цієї таблиці в інтернеті та переформотуй ці дані у SQL запит який би заповнював цю таблицю». Результат такого запиту ChatGPT 3.5 на рисунку 5.

```
-- Вставляємо дані в таблицю Country
INSERT INTO Country (CountryName)
VALUES ('USA');
INSERT INTO Country (CountryName)
VALUES ('China');
INSERT INTO Country (CountryName)
VALUES ('India');
-- Вставляємо дані в таблицю Gender
INSERT INTO Gender (GenderName)
VALUES ('Male');
INSERT INTO Gender (GenderName)
VALUES ('Female');
-- Вставляємо дані в таблицю Year
INSERT INTO Year (YearValue) VALUES
(2020);
-- Вставляємо дані в таблицю
LifeExpectancy
INSERT INTO LifeExpectancy (CountryID,
GenderID, YearID, LifeExpectancy)
VALUES
((SELECT CountryID FROM Country
WHERE CountryName = 'USA'),
(SELECT GenderID FROM Gender WHERE
GenderName = 'Male'),
(SELECT YearID FROM Year WHERE
YearValue = 2020),
76.3),
((SELECT CountryID FROM Country
WHERE CountryName = 'USA'),
(SELECT GenderID FROM Gender WHERE
GenderName = 'Female'),
```

```

(SELECT YearID FROM Year WHERE
YearValue = 2020),
81.2),
((SELECT CountryID FROM Country
WHERE CountryName = 'China'),
(SELECT GenderID FROM Gender WHERE
GenderName = 'Male'),
(SELECT YearID FROM Year WHERE
YearValue = 2020),
72.4),
((SELECT CountryID FROM Country
WHERE CountryName = 'China'),
(SELECT GenderID FROM Gender WHERE
GenderName = 'Female'),
(SELECT YearID FROM Year WHERE
YearValue = 2020),
77.6),
((SELECT CountryID FROM Country
WHERE CountryName = 'India'),
(SELECT GenderID FROM Gender WHERE
GenderName = 'Male'),
(SELECT YearID FROM Year WHERE
YearValue = 2020),
68.9),
((SELECT CountryID FROM Country
WHERE CountryName = 'India'),
(SELECT GenderID FROM Gender WHERE
GenderName = 'Female'),
(SELECT YearID FROM Year WHERE
YearValue = 2020),
71.6);

```

Рисунок 5. – Заповнення бази даних за допомогою ІІІ «ChatGPT 3.5»

В цілому ChatGPT 3.5 впорався з поставленими задачами, але ChatGPT 3.5 має доступ лише до внутрішніх баз даних, які були створені ще в 2022 році, тому ChatGPT 3.5 не може надати актуальну інформацію, також ChatGPT 3.5 не завжди знаходить інформацію, інколи на запит про пошук інформації видає відповідь: «На жаль, я не можу надати поточної статистики щодо тривалості життя у різних країнах, оскільки моя база даних не містить свіжої інформації. Однак, ви можете знайти цю інформацію в Інтернеті на сайтах статистичних агентств, таких як Всесвітня організація охорони здоров'я (ВООЗ), Центри контролю та профілактики захворювань (CDC) США, Європейська служба статистики (Eurostat) та інші. Також є різні дослідження та звіти, які аналізують тривалість життя в різних країнах та регіонах. Ці дані можуть бути корисними для порівняння тривалості життя в різних частинах світу. »

Усі SQL запити які згенерував ChatGPT 3.5 синтаксично були вірними, та при запуску цих

запитів на SQL сервері ніяких помилок не виникало. На рисунку 6 можна переглянути діаграму створеної бази даних.

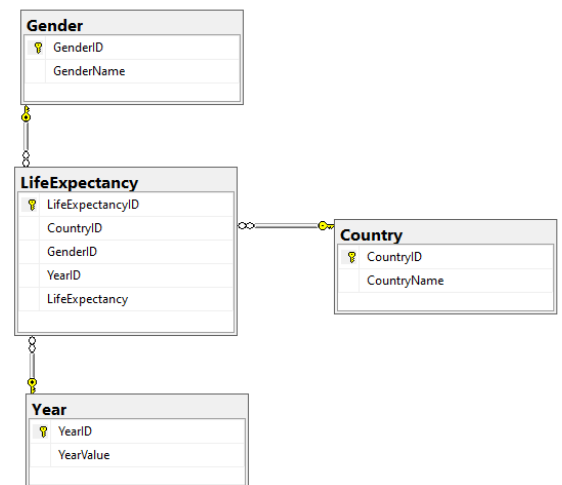


Рисунок 6. – Діаграма бази даних створенню за допомогою «ChatGPT 3.5»

Наступною системою ІІІ яку пропонується розглянути буде система штучного інтелекту Microsoft Copilot (Microsoft Bing Chat). Було виконано всі запити які виконували для ChatGPT 3.5. Microsoft Copilot впорався з цією задачею, та видав відповідь у вигляді невеликого SQL запиту та пояснювання до полів, який можна побачити на рисунку 7.

```

CREATE TABLE Demographics (
  ID INT PRIMARY KEY IDENTITY(1,1),
  Country NVARCHAR(100),
  Gender NVARCHAR(10),
  Year INT,
  AverageLifeExpectancy FLOAT
);

```

Цей код створює таблицю Demographics з наступними полями:

ID: унікальне поле, яке автоматично збільшується на 1 з кожним новим записом.

Country: поле для зберігання назви країни.

Gender: поле для зберігання статі.

Year: поле для зберігання року.

AverageLifeExpectancy: поле для зберігання середньої тривалості життя.

Рисунок 7. – Створення бази даних, та опис полів ІІІ «Microsoft Copilot»

Наступним кроком для Microsoft Copilot став нормалізація бази даних. Виконано запит «Нормалізуй створену базу даних базу даних». Microsoft Copilot впорався з цією задачею та надав відповідь у вигляді SQL запиту на створення нормалізованої бази даних, зображеному на рисунку 8.

```
CREATE TABLE Countries (
    CountryID INT PRIMARY KEY
    IDENTITY(1,1),
    Country NVARCHAR(100)
);

CREATE TABLE Genders (
    GenderID INT PRIMARY KEY
    IDENTITY(1,1),
    Gender NVARCHAR(10)
);

CREATE TABLE Demographics (
    ID INT PRIMARY KEY IDENTITY(1,1),
    CountryID INT FOREIGN KEY
    REFERENCES Countries(CountryID),
    GenderID INT FOREIGN KEY
    REFERENCES Genders(GenderID),
    Year INT,
    AverageLifeExpectancy FLOAT
);
```

Рисунок 8. – Нормалізація бази даних виконана ШІ «Microsoft Copilot»

Також була спроба знайти інформацію для заповнення цієї бази даних та переформатувати її у SQL запит щоб заповнити цими даними таблиці виконавши запит: «Найди данні для цієї таблиці в інтернеті та переформотуй ці дані у SQL запит який би заповнював цю таблицю». У відповідь на цей запит Microsoft Copilot надає гіпотетичні дані (іншими словами він їх вигадав). Відповідь можливо побачити на рисунку 9.

Вибачте, але я не можу знайти конкретні дані в Інтернеті та перетворити їх у SQL-запити. Однак я можу показати вам, як ви можете створити SQL-запити для заповнення таблиці на основі прикладу даних. Припустимо, у вас є наступні дані:

Країна: Україна
Стать: Чоловіча
Рік: 2024
Середня тривалість життя: 72 роки

Ви можете використати наступні SQL-запити для заповнення таблиці:

```
INSERT INTO Countries (Country) VALUES ('Україна');
INSERT INTO Genders (Gender) VALUES ('Чоловіча');
INSERT INTO Demographics (CountryID, GenderID, Year, AverageLifeExpectancy) VALUES ((SELECT CountryID FROM Countries WHERE Country = 'Україна'), (SELECT GenderID FROM Genders WHERE Gender = 'Чоловіча'), 2024, 72);
```

Рисунок 9. – Заповнення бази даних ШІ «Microsoft Copilot»

Microsoft Copilot впорався з поставленими задачами частково, усі SQL запити робочі і виконуються без помилок, але не зміг знайти дані у відкритому доступі. Також Microsoft Copilot відзначився дуже повільною роботою, генерація відповідей може займати близько 5ти хвилин. На рисунку 10 можливо побачити діаграму бази даних.

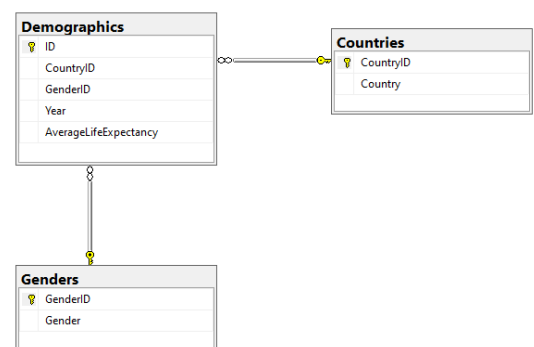


Рисунок 10. - Діаграма бази даних створенню за допомогою Microsoft Copilot

Останньою системою ШІ була Opera Aria. При запиті «Створи базу даних на мові T-SQL з полями: унікальне поле, країна, стать, рік, середня тривалість життя» Opera Aria генерує SQL запит і дає невелике пояснення що до полів в таблиці, відповідь можна побачити на рисунку 11.

```
CREATE TABLE Демографічні_дані (
    ID INT PRIMARY KEY IDENTITY(1,1),
    Країна NVARCHAR(50),
    Стать NVARCHAR(10),
    Рік INT,
    Середня_тривалість_життя FLOAT
);
```

У цій таблиці ми маємо наступні поля:

ID: унікальний ідентифікатор запису
Країна: назва країни
Стать: стать осіб (чоловіки, жінки тощо)
Рік: рік, до якого відносяться демографічні дані

Середня_тривалість_життя: середня
тривалість життя населення у вказаному
році

Рисунок 11. – Створення та опис полів
згенеровані ІІІ «Opera Aria»

Наступним запитом був нормалізувати базу
даних. Результат роботи системи ІІІ можна
побачити на рисунку 12.

```
CREATE TABLE Країни (
  ID INT PRIMARY KEY IDENTITY(1,1),
  Назва NVARCHAR(50) UNIQUE
);
CREATE TABLE Стати (
  ID INT PRIMARY KEY IDENTITY(1,1),
  Назва NVARCHAR(10) UNIQUE
);
CREATE TABLE Демографічні_дані (
  ID INT PRIMARY KEY IDENTITY(1,1),
  Країна_ID INT,
  Стать_ID INT,
  Рік INT,
  Середня_тривалість_життя FLOAT,
  FOREIGN KEY (Країна_ID)
REFERENCES Країни(ID),
FOREIGN KEY (Стать_ID) REFERENCES
Стати(ID)
);
```

Рисунок 12. – Нормалізація бази даних
виконана ІІІ «Opera Aria»

Opera Aria також впорався з цією задачею.
На запит: «Найди данні для цієї таблиці в інтернеті
та переформатуй ці дані у SQL запит який би
заповнював цю таблицю» ІІІ Opera Aria відповів
таким чином: «На жаль, я не можу знайти дані для
цієї таблиці в реальному часі. Будь ласка, спробуйте
переформулювати своє запитання або надати більше
деталей, щоб я міг допомогти вам.»

Запит іншим чином був переформулюван:
«Надай інформацію про середню тривалість життя у
будь-якій країні та переформатуй цю інформацію у
SQL запит який буде заповнювати базу даних яку ти
щойно створив». Opera Aria зміг сформулювати SQL
запит, рисунок 13.

```
INSERT INTO Країни (Назва) VALUES ('Монако');
INSERT INTO Країни (Назва) VALUES ('Сінгапур');
INSERT INTO Країни (Назва) VALUES ('Макао
(Китай)');
INSERT INTO Країни (Назва) VALUES ('Японія');
```

```
INSERT INTO Демографічні_дані (Країна_ID, Стать,
Рік, Середня_тривалість_життя) VALUES
```

```
((SELECT ID FROM Країни WHERE Назва =
'Монако'), 'Чоловіки', 2024, 89.52),
((SELECT ID FROM Країни WHERE Назва =
'Монако'), 'Жінки', 2024, 89.52),
((SELECT ID FROM Країни WHERE Назва =
'Сінгапур'), 'Чоловіки', 2024, 86.35),
((SELECT ID FROM Країни WHERE Назва =
'Сінгапур'), 'Жінки', 2024, 86.35),
((SELECT ID FROM Країни WHERE Назва =
'Макао (Китай)'), 'Чоловіки', 2024, 84.98),
((SELECT ID FROM Країни WHERE Назва =
'Макао (Китай)'), 'Жінки', 2024, 84.98),
((SELECT ID FROM Країни WHERE Назва =
'Японія'), 'Чоловіки', 2024, 84.83),
((SELECT ID FROM Країни WHERE Назва =
'Японія'), 'Жінки', 2024, 84.83);
```

Рисунок 13. – Заповнення бази даних за допомогою
ІІІ «Opera Aria»

Але цей запит не вірний. У згенерованому
запиті передбачається що в базі даних є 2 таблиці:
таблиця «Країни» та таблиця «Демографічні_дані»,
але кроком вище Opera Aria створив базу даних із
3-х таблиць, а саме: «Країни», «Стать»,
«Демографічні_дані». Тому згенерований SQL запит
не відповідає структурі бази даних, та не може бути
виконаний. З рештою через декілька ітерацій та
підказок Opera Aria зміг згенерувати запит на
заповнення бази даних, на рисунку 14

```
INSERT INTO Країни (Назва) VALUES ('Україна');
INSERT INTO Стати (Назва) VALUES ('Чоловіки'),
('Жінки');
INSERT INTO Демографічні_дані (Країна_ID,
Стать_ID, Рік, Середня_тривалість_життя) VALUES
((SELECT ID FROM Країни WHERE Назва =
'Україна'), (SELECT ID FROM Стати WHERE Назва
= 'Чоловіки'), 2021, 68.2),
((SELECT ID FROM Країни WHERE Назва =
'Україна'), (SELECT ID FROM Стати WHERE Назва
= 'Жінки'), 2021, 75.1);
```

Рисунок 14. – Виправлений запит на заповнення
бази даних згенерований ІІІ «Opera Aria»

Приведенні SQL запити являються вірними і
виконались на SQL сервері без помилок. Однак у
Opera Aria не завжди розуміє що потрібно зробити і
потребує декілька уточнюючих запитів. Також має
проблеми продуктивністю і довго обробляє запити.

Висновки

Основоючись на отриманих даних, усі
вказані системи штучного інтелекту з рештою
впорались з поставленими задачами. ChatGPT 3.5
показав себе як найшвидша система ІІІ, достатньо

точними виявились системи ChatGPT 3.5 та Microsoft Copilot. Однак системи III Microsoft Copilot та Opera Aria виявились занадто повільними. Запити до цих систем можуть довго обробляться (~ 5 хвилин). Також Opera Aria не завжди розуміє що від нього потребують, і не може зразу дати відповідь на питання, а через декілька уточнюючих запитів. Враховуючи ці факти, а також те що ChatGPT від компанії OpenAI має свій API цнй III має переваги для створень баз даних.

Планується перевірити ChatGPT на можливість створення спеціалізованих структур знань для FAI (Feeling Artificial Intelligence). ChatGPT версії 4.0o як більш досконала версія ChatGPT 3.5 що має можливість працювати з файлами та дозволяє генерувати SQL запити на створення баз даних буде протестовано щодо створення нових моделей III [19,20].

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Topol, E. Deep Medicine: How Artificial Intelligence Can Make Healthcare Human Again / E. Topol. – New York: Basic Books, Mar. 2019. – pp.75–120 ISBN-13 : 978-1541644632
2. Davenport, T. H., Kalakota, R. "The potential for artificial intelligence in healthcare" / T. H. Davenport, R. Kalakota. – Future Healthcare Journal, 6(2), 2019. – pp. 94-98. doi: 10.7861/futurehosp.6-2-94
3. WEF. The Future of Jobs Report 2018 / World Economic Forum. – Geneva: World Economic Forum, 2018. – pp. 5-6.
4. Davenport, T., Guha, A. The AI Advantage: How to Put the Artificial Intelligence Revolution to Work / T. Davenport, A. Guha. – Cambridge: MIT Press, 2018. – pp.23–39. ISBN 9780262039178
5. Bessen, J. E. "AI and Jobs: The Role of Demand" / J. E. Bessen. – NBER Working Paper, No. 24235. – National Bureau of Economic Research, 2019. – pp. 14-15. doi 10.3386/w24235
6. Luckin, R., Holmes, W., Griffiths, M., Forcier, L. B. Intelligence Unleashed: An Argument for AI in Education / R. Luckin, W. Holmes, M. Griffiths, L. B. Forcier. – London: Pearson, 2016. – pp. 18 – 21. ISBN-13: 9780992424886
7. McKinsey. Notes from the AI frontier: Applications and value of deep learning / McKinsey Global Institute. – McKinsey & Company, 2018. – pp. 7 – 16
8. Eggers, W. D., Schatsky, D., Viechnicki, P. AI-augmented government / W. D. Eggers, D. Schatsky, P. Viechnicki. – Deloitte Insights, 2017. – pp. 7–14.
9. E. Guizzo, Types of Robots. Categories frequently used to classify robots. Robotsguide.com. <https://robotsguide.com/learn/types-of-robots> (accessed Jun. 15, 2024).
10. Open X-Embodiment: Robotic Learning Datasets and RT-X Models Open X-Embodiment Collaboration, 2024. [Online]. Available: <https://robotics-transformer-x.github.io/>
11. S. Levine, K. Hausman, "The global project to make a general robotic brain," IEEE Spectrum, Jan 2024. [Online]. Available: <https://spectrum.ieee.org/global-robotic-brain>
12. MIT researchers introduce generative AI for databases: <https://news.mit.edu/2024/mit-researchers-introduce-generative-ai-databases-0708> (accessed Nov. 20, 2024)
13. End-to-end tools to productionize AI and data science. Domo. <https://www.domo.com/data-integration/data-science> (accessed Nov. 20, 2024).
14. David Bunting. How to use GenAI for database query optimization and natural language analysis. <https://www.chaossearch.io/blog/genai-database-query-natural-language> (accessed Nov. 20, 2024).
15. "Database System Concepts" by Abraham Silberschatz, Henry Korth, S. Sudarshan / Abraham Silberschatz, Henry Korth, S. Sudarshan. 7th edition (February 19, 2019). pp. 241–453. ISBN 978-0078022159
16. GPT-4. OpenAI. <https://openai.com/index/gpt-4-research/> (accessed Nov. 20, 2024).
17. 11 Best Generative AI Tools and Platforms. <https://www.turing.com/resources/generative-ai-tools> (accessed Nov. 20, 2024).
18. Guiding Principles for Working with GenAI and SQL Data. <https://www.clearobject.com/genai-guiding-principles/> (accessed Nov. 20, 2024).
19. A. Kargin and T. Petrenko, "Feeling Artificial Intelligence for AI-Enabled Autonomous Systems," in Proc. of 2022 IEEE Global Conf. on Artificial Intelligence and Internet of Things (GCAIoT) Alamein New City, Egypt, Dec.18, 2022, pp.88-93.
20. A. Kargin and T. Petrenko, "Knowledge Distillation for Autonomous Intelligent Unmanned System," in W. Pedrycz, S.-M. Chen. Advancements in Knowledge Distillation: Towards New Horizons of

Intelligent Systems. Studies in Comput. Intell., vol. 1100. Springer International Publishing, 2023, pp. 193-230, doi: 10.1007/978-3-031-32095-8_7.

Kargin A.O., Torhonskyi A.V. Regarding the possibilities of using artificial intelligence to create databases

Information technology for creating knowledge bases is part of the knowledge management system, which allows you to automate the processes of knowledge collection, analysis, and management. This technology uses Artificial Intelligence (AI) services to select the most relevant information and integrate it into the knowledge bases. The study of the method of creating knowledge bases with the help of AI allows the development of a new knowledge management algorithm, which will significantly improve the efficiency and accuracy of the system. This paper proposes a new method of transition from traditional techniques of database creation and data collection to automated ones based on AI. The results of the comparison of three artificial intelligence models in terms of the ability to create a database, normalize it, find and fill the database, as well as the speed of query execution are presented.

Keywords: databases, knowledge management system, artificial intelligence services.

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

Торгонський Антон Вадимович, аспірант кафедри інформаційних технологій, Український державний університет залізничного транспорту, Харків, Україна. E-mail: torgonskiy@kart.edu.ua, ORCID ID <https://orcid.org/0009-0008-4309-8032>.

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

Torhonskyi Anton, PhD student, department of Information Technology, Ukrainian State University of Railway Transport, Kharkiv, Ukraine. E-mail: torgonskiy@kart.edu.ua, ORCID ID <https://orcid.org/0009-0008-4309-8032>.

ЯЦЬКО С. І., к. т. н., доцент кафедри «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»

ЛЯШЕНКО В. М., аспірант кафедри «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»,

Холістичний підхід для ухвалення рішень щодо енергозбереження на рейковому транспорті

***Анотація.** Глобальні прагнення до сталого розвитку та енергетичної ефективності привертають значну увагу до цілеспрямованих заходів з енергозбереження в секторі залізничного транспорту. Зазвичай традиційні підходи до управління енергоспоживанням у залізничних системах є фрагментарними і зосереджені на окремих технологічних або експлуатаційних удосконаленнях ізольовано. Ці заходи мають певний успіх, але не завжди враховують складність залізничної транспортної системи в цілому. Необхідна більша комплексна стратегія, яка б урахувала взаємопов'язану природу інфраструктури, технологій, політики та експлуатації. Для цього у статті запропоновано варіант цілісної концепції для ухвалення рішень щодо політики енергозбереження в секторі залізничного транспорту. Основна мета полягає в поліпшенні типового циклу ухвалення рішень транспортними підприємствами щодо енергозбереження. У статті проаналізовано досвід упровадження холістичних практик в інших галузях людської діяльності і досліджено, як цілісна методологія може підвищити ефективність політики і практики енергозбереження в залізничному секторі.*

***Ключові слова:** холістичний підхід, енергозбереження, залізничний транспорт, транспортне підприємство, ухвалення рішень.*

Постановка проблеми

Галузь залізничного транспорту перебуває під постійним тиском щодо необхідності скорочення споживання енергії та мінімізації впливу на навколишнє середовище. Незважаючи на зусилля щодо підвищення енергетичної ефективності, ці заходи часто спрямовані на конкретні аспекти системи, такі як удосконалення рухомого складу або зміни в експлуатації, без урахування ширшої залежності в межах залізничної мережі. Такий несистемний підхід не дає змогу повністю реалізувати наявний потенціал скорочення енергоспоживання, що призводить до неоптимальних результатів як у сфері енергетичного менеджменту, так і в досягненні цілей сталого розвитку.

Тому потрібний ширший підхід до залізничного транспорту як до взаємопов'язаної структури, що складається з підсистем. Ефективність функціонування цих підсистем відіграє важливу роль у визначенні загальної енергоефективності залізничної мережі. Однак покращення в межах окремої підсистеми навряд чи забезпечать максимальну економію енергії, якщо

вони не будуть узгоджені в рамках цілісної стратегії, що враховувала б взаємодію та взаємозалежність між ними.

Стаття спрямована на вирішення цієї проблеми, пропонуючи холістичний підхід до розроблення стратегій енергозбереження на залізничному транспорті. У роботі заплановано розробити варіант концепції, яка дала б змогу керівникам і стейкхолдерам залізничного транспорту ухвалювати обґрунтовані міжфункційні рішення, які врешті-решт призвели б до підвищення ефективності політики та практики енергозбереження в усій залізничній транспортній системі.

Аналіз останніх досліджень та публікацій

Аналіз наявної літератури показує помітну прогалину в дослідженнях, орієнтованих на цілісний, міжфункційний підхід до енергозбереження на залізничному транспорті. Незважаючи на те, що в окремих галузях, таких як удосконалення технології рухомого складу, оптимізація експлуатації та менеджмент енергетичної інфраструктури, було проведено значну роботу з підвищення енергоефективності,

відчувається нестача комплексних досліджень, які б аналізували синергію між рішеннями, що ухвалюють у цих ізольованих підсистемах. Потрібні публікації та дослідження, які б прямо розглядали питання взаємодії підсистем залізничного транспорту одна з одною для формування інтегрованої, більш ефективної стратегії скорочення енергоспоживання.

Така неувага до цілісного підходу з енергоменеджменту на залізничному транспорті проявляється в епізодичному, часто дуже формальному підході дослідників до цієї теми. Сучасні дослідження зазвичай розглядають заходи з енергозбереження у вузькому, розрізненому контексті. Наприклад, численні роботи зосереджені виключно на оптимізації графіків і траєкторій руху поїздів [1-4] або підвищенні енергоефективності рухомого складу [5, 6], тоді як інші присвячені технічним аспектам енергетичної інфраструктури, таким як інтеграція «розумних» мереж або систем рекуперативного гальмування. Ці зусилля, хоч і цінні самі по собі, не завжди враховують ширшу взаємодію на рівні системи, яка могла б забезпечити додаткові заощадження енергії завдяки міжфункційній залежності підсистем залізничного транспорту.

Схожа тенденція спостерігається і в інших галузях, де певною мірою фрагментарний характер досліджень у сфері енергоменеджменту часто не враховує переваги більш інтегрованого підходу. Проте в цих дисциплінах спостерігають поступовий зсув у бік визнання цінності цілісних стратегій. Наприклад, у сфері міських енергетичних систем дослідники почали застосовувати системне мислення, щоб інтегрувати транспорт, використання енергії в будівлях і виробництво відновлюваної енергії в єдину концепцію [7, 8]. Ці дослідження підкреслюють зростаюче визнання необхідності комплексного підходу до енергоменеджменту в складних системах.

Питанню практичної інтеграції цілісних підходів для ухвалення рішень на транспортних підприємствах приділено недостатньо уваги. Ураховуючи успіх холистичних практик в інших галузях, можна стверджувати, що їхня інтеграція в енергетичну політику залізниць може дати значні переваги. Розглядаючи залізничну систему як мережу взаємозалежних підсистем, особи, які ухвалюють рішення, можуть дослідити можливі синергетичні ефекти, які в іншому випадку залишаються невиявленими за ізольованого аналізу. Застосування такого комплексного підходу, підкріпленого надійною системою ухвалення рішень, може значно підвищити ефективність стратегій енергозбереження в секторі залізничного транспорту.

Постановка завдання. Ця стаття має на меті розглянути залізничну транспортну систему

через призму холистичного підходу, згрупувавши низку її складових у три основні підсистеми: рухомий склад, експлуатаційні практики та енергопостачання і енергоменеджмент. Шляхом аналізу досліджень у сфері енергозбереження на залізничному транспорті, що використовують синергію між підсистемами залізниці, у статті здійснено спробу покращити цикл ухвалення рішень на транспортних підприємствах у контексті формування політик енергозбереження. Завдання полягає в тому, щоб визначити, як цілісне бачення залізниці як системи може максимізувати її енергетичну ефективність, виходячи за рамки ізольованих заходів з енергозбереження, і розробити фреймворк ухвалення рішень для сталого управління енергоспоживанням на залізниці.

Виклад основної частини матеріалу.

Проблема досягнення оптимального енергозбереження на залізничному транспорті є складною через багатогранність і залежність його підсистем одна від одної. Такі ключові елементи, як енергопостачання, енергоменеджмент, рухомий склад і його експлуатація, не є ізольованими, а функціонують у динамічному та взаємопов'язаному середовищі. Цей зв'язок значно ускладнює формування оптимальної політики енергозбереження. Більшість стратегій енергозбереження зазвичай зосереджені на локальних покращеннях у межах окремих систем, а не на взаємодії між цими компонентами. Це може призводити до неоптимальних результатів. Наприклад, рекуперативне гальмування, оптимальні траєкторії руху та розумне управління енергоспоживанням («smart grid») зазвичай розглядають окремо. Відсутність інтеграції заважає цим стратегіям повністю реалізувати свій потенціал. У той же час комплексний підхід, що включає складання графіків руху з урахуванням оптимальних траєкторій руху, дає змогу значно знизити споживання енергії в системах залізничного транспорту. Цей метод збалансовує тягову енергію та енергію рекуперації, що було б неможливо без урахування загальносистемних взаємодій [9]. Такі стратегії, як синхронізований графік руху поїздів із використанням їхнього рекуперативного гальмування, є іншим прикладом дієвого використання цілісного підходу до енергозбереження [10]. Отже, цілісний підхід до енергозбереження на залізничному транспорті пом'якшує проблему субоптимальних стратегій, ураховуючи всю мережу взаємодій між різними підсистемами.

Будь-який технічний об'єкт є складовою іншої системи, яка у свою чергу є складовою більш масштабної надсистеми [11]. Залізничний транспорт у цьому не є виключенням. Для розроблення ефективної стратегії енергозбереження на залізничному транспорті

необхідно поділити залізничну систему на окремі підсистеми. Такий поділ дає змогу детально проаналізувати зв'язки і залежності між компонентами, що є важливим для розуміння того, як зміни в одній підсистемі впливають на інші. Однак спосіб, у який здійснюють цей поділ, може суттєво відрізнятися залежно від специфічних характеристик кожного транспортного підприємства та рівня деталізації, якого бажають досягти в аналізі.

Як наслідок, не існує та не може існувати одного стандартного або універсального способу поділу цих систем на компоненти. Наприклад, транспортне підприємство може вирішити застосувати агрегований підхід, згрупувавши системи в широкі категорії, або ж вибрати більш детальний, гранульований аналіз, поділивши підсистеми на найдрібніші компоненти. Гнучкість у поділі необхідна для того, щоб адаптувати стратегії енергозбереження до конкретних потреб та особливостей діяльності кожного окремого підприємства. Зі збільшенням кількості підсистем зростає і кількість взаємодій між ними. Складність зростає не просто лінійно, а експоненційно, оскільки кожна підсистема потенційно взаємодіє з кожною іншою підсистемою в безліч способів. Це призводить до комбінаторного вибуху факторів, які необхідно враховувати, що ускладнює управління, оптимізацію та розуміння системи в цілому. Взаємозалежності та взаємодії стають настільки численними, що аналізувати та оптимізувати кожну підсистему ізольовано, урахувуючи всі можливі взаємодії, стає непрактичним. Найбільш загальним способом поділу залізничного транспорту як системи в контексті енергозбереження можна вважати поділ його на такі три основні підсистеми:

- *рухомий склад* – усі складові самого рухомого складу, такі як поїзди, вагони та локомотиви. У цій категорії аналізують такі фактори, як керування тягою, гальмівні системи та енергетичний баланс у межах складу;
- *експлуатаційні практики* – процедури та підходи, використовувані для складання розкладу руху поїздів, практики керування та обслуговування;
- *постачання та менеджмент енергії* – інфраструктура для розподілу енергії, мережі електропостачання, накопичувачі енергії та системи управління.

Взаємодію між цими підсистемами можна ефективно подати як діаграму Венна (рис. 1). Ця візуалізація підкреслює області перекриття, де кілька підсистем взаємодіють і впливають одна на одну.



Рис. 1. Діаграма Венна холистичного підходу до енергетичної ефективності на підприємстві залізничного транспорту

За експоненційного зростання складності визначення оптимальної структури підсистем має вирішальне значення. Оптимальна структура є певним компромісом між потребою в детальному аналізі та власною складністю. Холистичний підхід для розроблення політики енергозбереження означає, що поле ухвалення рішень на діаграмі Венна знаходиться в межах перекриття областей, а не в самих областях.

Взаємопов'язаний характер сучасних залізничних технологій означає, що досягнення в одній сфері можуть безпосередньо впливати на інші, що може істотно підвищити загальну ефективність системи. Прикладом є використання рекуперативного гальмування на рухомому складі, що неможливе без відповідної адаптації систем постачання електроенергії. Розвиток систем накопичення енергії, які є двонаправленими елементами (тобто залежно від обставин виконують роль як постачальника, так і споживача електричної енергії), відкрив нові можливості для використання рекуперативного гальмування. Накопичувачі енергії на електрифікованих залізницях значно покращують використання енергії рекуперативного гальмування, що призводить до значних переваг для перевезень і майбутніх електрифікованих ліній [12-15]. Значного збереження енергії можна досягти також шляхом узгодження графіків руху за використання рекуперативного гальмування [16]. Ефект від подібної синергії двох підсистем залізниці є комплексним і не обмежений зменшенням витрат, а також має позитивні наслідки в контексті

екології та сталості залізничного транспорту. Істотних результатів можна досягти, залучаючи одночасно потенціал до покращення всіх трьох підсистем шляхом використання рекуперації, накопичувачів енергії та оптимальних графіків руху [17].

Перехід до холистичного підходу в контексті енергоменеджменту і енергозбереження неможливий без змін в алгоритмах ухвалення рішень підприємствами залізничного транспорту. Типовий цикл ухвалення управлінських рішень наведено на схемі рис. 2.

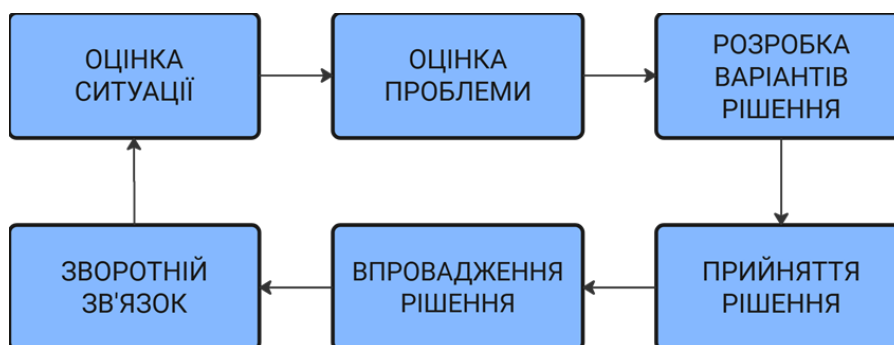


Рис. 2. Типовий цикл ухвалення управлінських рішень на транспортному підприємстві

Недоліком подібного циклу є відсутність гнучкості, необхідної для вирішення комплексних проблем системного рівня. Традиційне ухвалення рішень зазвичай зосереджене на оптимізації конкретних показників, прагнучи до короткострокових покращень або рішень, спрямованих на найнагальніші проблеми. З розробленням варіантів (альтернатив) і відбором заходів до впровадження кожен конкретну альтернативу розглядають і оцінюють окремо від інших. Критеріями відбору (очікуваний рівень збереження енергії, ціна, технологічність і т. п.) при цьому виступають показники, характерні для ізолюваного впровадження такого рішення, що спотворює уявлення про реальні можливості системи та призводить до неоптимальних стратегій впровадження заходів у системі. Прикладом спотворення поля ухвалення рішень можуть бути систематичні упередженості експертних висновків щодо певних альтернатив («набуте розуміння») із наданням пріоритету рішенням, наприклад, з невисокими капіталовкладеннями та швидким терміном окупності [18]. Однією з причин появи

подібного набутого розуміння можна вважати сприйняття альтернатив як сукупності готових рішень із відомим ефектом, який експерти можуть оцінювати як такий, що практично не змінюється від особливостей операцій конкретного транспортного підприємства. Системне мислення, за якого кожен альтернативу оцінюють у взаємодії та можливій синергії з іншими альтернативами, є менш чутливим до подібних систематичних упередженостей. Одним із прикладів інтеграції системного мислення для ухвалення рішень є метод «розділяй і володарюй» (англ. *Divide-and-conquer approach*), за якого експерти поділяють комплексну проблему на менші, більш прості в управлінні компоненти, ураховуючи при цьому, як ці частини пов'язані з загальним цілим. Цей підхід є ефективним для подолання наслідків когнітивних обмежень [19].

Можливий варіант адаптації управлінського циклу ухвалення рішень з інтеграцією холистичного підходу та урахуванням можливих упередженостей осіб, які ухвалюють рішення (рис. 3).

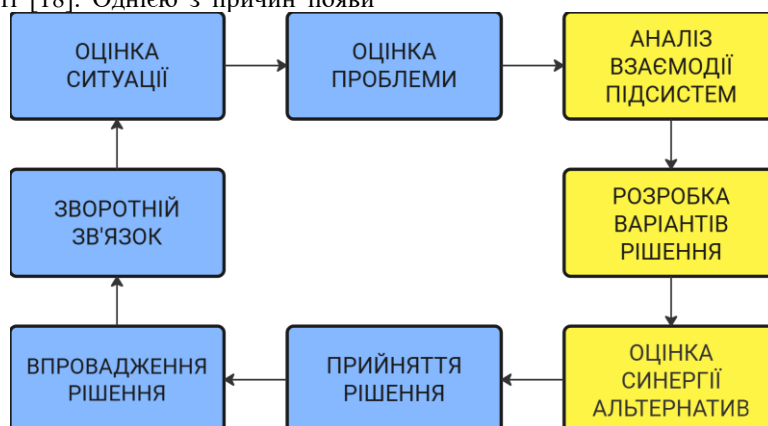


Рис. 3. Варіант циклу ухвалення рішень на транспортному підприємстві за холістичного підходу

На відміну від традиційного циклу, у ньому введений етап аналізу взаємодії підсистем, що дає змогу перейти до обґрунтованого пошуку варіантів рішень не як окремих заходів, а комбінацій таких заходів. Як наслідок, змін зазнають і критерії відбору заходів до впровадження, що потребує додаткового оцінювання сумарних ефектів від їх упровадження в умовах конкретного транспортного підприємства.

Висновки

1. Зростання цін на енергоносії та зміни в номенклатурі ринку транспортних послуг (конкуренція різних видів транспорту між собою) підтримують актуальність проблеми енергозбереження на залізничному транспорті протягом тривалого часу. Потреба в подальшому зниженні енерговитрат обумовлює необхідність переходу від уже традиційних фрагментарних підходів до цілісного (холістичного) підходу.

2. Розвиток певних технологій, таких як багатофункційні системи накопичення та зберігання енергії тощо, сприяє зростанню кількості варіантів побудови стратегій з енергозбереження і сталості підприємств рейкового транспорту. Це дає змогу переосмислити перелік вимог як до системи залізничного транспорту взагалі, так і окремих її підсистем (рухомого складу, експлуатаційних практик і системи постачання і менеджменту енергії). Оскільки традиційні підходи до енергозбереження зосереджені на окремих аспектах системи, вони не дають змогу повністю реалізувати потенціал скорочення енергоспоживання через неврахування системних взаємозв'язків. Тому ефективний підхід до енергозбереження потребує аналізу взаємодії між цими підсистемами.

3. Використання холістичного підходу для побудови стратегії з енергозбереження дає змогу виявити синергетичні ефекти між різними заходами, що може призвести до значно більшої економії енергії, ніж за ізольованого впровадження окремих рішень, а також знизити ризики від можливих впливів упереджень в експертних висновках.

4. Упровадження холістичного підходу потребує адаптації циклу ухвалення управлінських рішень, зокрема із введенням етапу аналізу взаємодії підсистем і зміни критеріїв відбору заходів до впровадження. Доцільним є ширше використання практики одночасного вибору комбінацій кількох альтернатив, які дають найбільший сумарний ефект.

Список використаних джерел

1. Shuai Su, Zhingbei Tian, Rob M. P. Goverde. *Energy-Efficient Train Operation. A System Approach for Railway Networks*. Cham: Springer, 2023. 234 с.
2. Jacyna M., Gołębiowski P. An approach to optimizing the train timetable on a railway network. *WIT Transactions on the Built Environment*. 2015. № 146. С. 699-710. DOI: 10.2495/UT150571.
3. Caimi G., Kroon L., Liebchen Christian. Models for railway timetable optimization: Applicability and applications in practice. *Journal of Rail Transport Planning & Management*. 2017. № 6. С. 285-312. DOI: 10.1016/j.jrtpm.2016.11.002.
4. Simulation of The System of Provision of Target Braking of Rolling Stock / Vadym Liashenko, Serhii Yatsko, Yaroslav Vaschenko, Mykola Khvorost. *Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті*. 2023. Т. 28, № 2. С. 63-73. DOI: 10.18664/ikszt.v28i2.283285.
5. Ronanki D., Siddhartha A. Singh, Williamson S. Comprehensive Topological Overview of Rolling Stock Architectures and Recent Trends in Electric Railway Traction Systems. *IEEE Transactions on Transportation Electrification*. 2017. № 3. С. 724-738. DOI: 10.1109/TTE.2017.2703583.
6. Application of flywheel energy storage for heavy haul locomotives / M. Spiragin, P. Wolfs, F. Szanto, Y. Sun, C. Cole, Dwayne Nielsen. *Applied Energy*. 2015. № 157. С. 607-618. DOI: 10.1016/J.APENERGY.2015.02.082.
7. Smart Energy Systems for coherent 100 % renewable energy and transport solutions / B. V. Mathiesen H. Lund, D. Connolly та ін. *Applied Energy*. 2015. № 145. С. 139-154. DOI: 10.1016/j.apenergy.2015.01.075.
8. Berjawi A. E. H., Walker S. L., Patsios C. An evaluation framework for future integrated energy systems: A whole energy systems approach. *Renewable & Sustainable Energy Reviews*. 2021. № 145. DOI: 10.1016/J.RSER.2021.111163.
9. An Energy-Efficient Train Operation Approach by Integrating the Metro Timetabling and Eco-Driving / S. Su, Xuekai Wang, Yuan Cao, Jiateng Yin. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*. 2020. № 21. С. 4252-4268. DOI:10.1109/TITS.2019.2939358.
10. A synergistic energy-efficient planning approach for urban rail transit operations / J. Ning, Yonghua Zhou, Feng-Qin Long, Xin Tao. *Energy*. 2018. № 151. С. 854-863. DOI: 10.1016/J.ENERGY.2018.03.111.
11. Яцько С. І. Методологія вибору раціональної стратегії визначення характеристик перспективного моторвагонного рухомого

- складу. *Збірник наукових праць ДонІЗТ*. 2012. № 29. С. 182-195.
12. Ratniyomchai T., Hillmansen S., Tricoli P. Recent developments and applications of energy storage devices in electrified railways. *IET Electrical Systems in Transportation*. 2014. № 4. С. 9-20.
 13. Energy storage systems to exploit regenerative braking in DC railway systems: Different approaches to improve efficiency of modern high-speed trains / M. Ceraolo, G. Lutzemberger, E. Meli, L. Pugi, A. Rindi, G. Pancari. *Journal of Energy Storage*. 2018. № 16. С. 269-279.
 14. Electrical transport with onboard energy storage / Sergiy Yatsko, Yaroslav Vashchenko, Anatoliy Sidorenko, Borys Liubarskyi, Bagish Yeritsyan. *International Journal of Renewable Energy Research*. 2019. Т. 9, № 2. С. 848-858. DOI: 10.20508/ijrer.v9i2.9143.g7652.
 15. Yatsko S., Vashchenko Ya., Sidorenko A. Development of strategies for reducing traction energy consumption by electric rolling stock. *Computational Problems of Electrical Engineering*. 2019. Т. 9, № 1. С. 44-51. DOI: 10.23939/jcpee2019.01.044.
 16. Comprehensive approach to modeling dynamic processes in the system of underground rail electric traction / Yatsko, S., Sytnik, B., Vashchenko, Y., Sidorenko, A., Liubarskyi, B., Veretennikov, I., & Glebova, M. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2019. Т. 1, № 9 (97). С. 48-57. DOI: 10.15587/1729-4061.2019.154520.
 17. González-Gil A., Palacin R., Batty P. Sustainable urban rail systems: strategies and technologies for optimal management of regenerative braking energy. *Energy Conversion and Management*. 2013. № 75. С. 374-388.
 18. Ляшенко В. М., Яцько С. І., Плахтій О. А. Досвід застосування MCDA при виборі заходів з енергозбереження на рейковому електричному транспорті. *Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті*. 2023. Т. 28, № 4. С. 46-54. DOI:10.18664/ikszt.v28i4.296506.
 19. Shanteau J. Psychological characteristics and strategies of expert decision makers. *Acta Psychologica*. 1988. № 68. С. 203-215. DOI: 10.1016/0001-6918(88)90056-X.

Liashenko V., Yatsko S. A holistic approach to energy saving decision making in rail transport.

Abstract. The global trend towards sustainability and energy efficiency is drawing considerable attention to dedicated energy saving measures in the rail transport sector. Traditional approaches to managing energy consumption in railway systems are usually fragmented and focus on individual technological or operational improvements in isolation. These measures often focus on specific aspects of the system, such as rolling stock improvements or operational changes, without

considering the wider interdependencies within the railway network. As a result, this ad hoc approach cannot fully realise the potential for energy savings, leading to sub-optimal results in terms of both energy management and sustainability goals.

A more comprehensive strategy is needed that takes into account the interconnected nature of infrastructure, technology, policy and operation. This paper therefore proposes a holistic framework for decision-making on energy saving policies in the rail transport sector. The main goal is to improve the typical decision-making cycle of transport companies regarding energy saving. This article analyses the experience of implementing holistic practices in other areas of human activity and explores how a holistic methodology can improve the effectiveness of energy saving policies and practices in the railway sector.

By approaching the railway system as a network of interdependent subsystems, decision makers and stakeholders can explore possible synergies that otherwise go undetected in an isolated analysis. Application of a holistic approach therefore can lead to significantly greater energy savings than the implementation of individual solutions alone, as well as reduce the risks from the possible effects of biases in expert assessments. Adopting such an integrated approach, backed by a robust decision-making system, can significantly increase the effectiveness and sustainability of energy saving strategies in the rail transport sector.

Keywords: holistic approach, energy saving, railway transport, transport company, decision-making.

Ляшенко Вадим Михайлович, аспірант кафедри електроенергетики, електротехніки та електромеханіки, Український державний університет залізничного транспорту, Харків, Україна. E-mail: lyashenkovm99@gmail.com. ORCID ID: <https://orcid.org/0009-0005-1139-3537>.

Яцько Сергій Іванович, кандидат технічних наук, доцент кафедри електроенергетики, електротехніки та електромеханіки, Український державний університет залізничного транспорту, Харків, Україна. E-mail: ua.yatsko@gmail.com. ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-5977-8613>.

Liashenko Vadym, Postgraduate, Department of Electrical Power Engineering, Electrical Engineering and Electromechanics, Ukrainian State University of Railway Transport, Kharkiv, Ukraine. E-mail: lyashenkovm99@gmail.com. ORCID ID: <https://orcid.org/0009-0005-1139-3537>.

Serhii Yatsko, PhD, Associate Professor of Department of Electrical Power Engineering, Electrical Engineering and Electromechanics, Ukrainian State University of Railway Transport, Kharkiv, Ukraine. E-mail: ua.yatsko@gmail.com. ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-5977-8613>.

УДК 620.179

СТОРОЖ В. Г., кандидат технічних наук, доцент (Національний університет «Львівська політехніка»),

НИКОЛИШИН М. Й., кандидат технічних наук, доцент (Національний університет «Львівська політехніка»),

МАТІЄШИН Ю. М., кандидат технічних наук, доцент (Національний університет «Львівська політехніка»),

МАНЬКОВСЬКИЙ С. В., кандидат технічних наук, старший викладач (Національний університет «Львівська політехніка»)

Використання телевізійних методів у швидкісній діагностиці дефектів залізничних колій

У роботі було проведено детальний аналіз закордонних і вітчизняних інформаційних джерел з питань, що стосуються застосування телевізійних візуально-вимірювальних систем, засобів і методів для швидкісної діагностики дефектів залізничних колій, а також оцінки стану дотичної залізничної інфраструктури. Проведено порівняльний аналіз основних технічних параметрів і характеристик розглянутих систем. Концепція автоматизованих телевізійних візуально-вимірювальних систем заснована на використанні високошвидкісної відеокамери, здатної захоплювати відеозображення рейкового шляху, коли транспортний засіб рухається над ним. Захоплені зображення автоматично аналізуються за допомогою спеціального програмного забезпечення для аналізу зображень. Аналіз програмним забезпеченням заснований на ідентифікації об'єктів або дефектів, виявлених за допомогою математичних методів крос-кореляції та вейвлет-перетворень. Особливу увагу у роботі скеровано на використання технологій машинного зору та нейронних мереж для підвищення автоматизації отримання та опрацювання результатів діагностики дефектів залізничних колій телевізійними методами.

Ключові слова: телевізійні методи; дефектоскопія; залізнична колія

Вступ

На кафедрі радіоелектронних пристроїв та систем Інституту телекомунікацій, радіоелектроніки та електронної техніки Національного університету «Львівська політехніка» впродовж тривалого часу виконувались науково-дослідні роботи з розробки сучасних сенсорів для магнітодинамічного методу дефектоскопії рейок залізничної колії [1-3], а також зі створення методологічних основ побудови радіоелектронних систем моніторингу об'єктів і сцен та розроблення електродинамічних та статистичних моделей процесів формування зображень системами з високою роздільною здатністю [4-6].

За результатами проведених робіт, зокрема, було створено восьмиканальний пошуковий давач на основі сенсорів Холла та діючий лабораторний макет багатоканальної інформаційно-діагностичної системи (ІДС) для пошуку, аналізу та класифікації дефектів залізничних рейок, розроблено різні методи виявлення сигналів від дефектів у режимі реального часу.

©СТОРОЖ В. Г., НИКОЛИШИН М. Й., МАТІЄШИН Ю. М., МАНЬКОВСЬКИЙ С. В. 2024

Працездатність лабораторного макета та восьмиканального пошукового давача була перевірена в процесі інспекції залізничної колії на магнітодинамічному вагоні-дефектоскопі № 442 структурного підрозділу «Львівський центр діагностики» [1-3].

Аналіз останніх досліджень та публікацій

Детальний аналіз сучасного стану розвитку мобільних засобів швидкісного неруйнівного контролю залізничної колії показує, що подальші зусилля з удосконалення їх основних технічних характеристик будуть здійснюватися за наступними напрямками [1, 2, 7]:

1) вдосконалення аналізу результатів дефектоскопії з метою повної автоматизації розпізнавання, оцінки та класифікації дефектів відповідно до чинних стандартів, класифікаторів та каталогів дефектів;

2) розробка нових інформаційних технологій обробки сигналів дефектоскопії, отриманих за допомогою найбільш поширених методів

контролю, з метою виявлення дефектів рейок та дотичної залізничної інфраструктури в режимі реального часу;

3) розробка високопродуктивних методів дефектоскопії для високошвидкісних рейок з використанням комп'ютерних алгоритмів виявлення та класифікації дефектів. Це дозволяє створювати нові апаратні реалізації, які є автономними, мобільними і, де це можливо, можуть бути об'єднаними та адаптованими до існуючих систем управління та зв'язку, що вже працюють на залізничному транспорті;

4) оптимізація та розробка високоефективних первинних перетворювачів, зокрема матричних, для приймання сигналів виявлених дефектів з рейкових пар.

У сфері розвитку систем моніторингу об'єктів та обробки зображень також спостерігаються деякі важливі тенденції [4-6]. Ось декілька основних:

1) підвищення ролі застосування систем штучного інтелекту (ШІ). Технології машинного і глибинного навчання дозволяють системам моніторингу об'єктів та обробки зображень автоматично розпізнавати об'єкти, проводити аналіз зображень і виявляти аномалії та дефекти. ШІ також використовується для покращення точності визначення параметрів та класифікації об'єктів на зображеннях;

2) збільшення загального обсягу даних: завдяки поширенню високоякісних відеокамер, дронів та інших пристроїв для збирання даних, системи моніторингу отримують все більші обсяги вхідних зображень. Це створює потребу в ефективному зберіганні, передаванні та опрацюванні цих даних. Технології опрацювання в реальному часі та великі дані (Big Data) стають все більш важливими для забезпечення швидкого та ефективного опрацювання великих обсягів зображень;

3) розширена реалістичність та аналіз відеозображень: з появою систем моніторингу з високою роздільною здатністю та відеоаналітичних рішень, з'являється можливість проводити детальний аналіз відеоданих. Технології відеоаналізу використовуються для розпізнавання об'єктів, виявлення руху, вирішення задач відстеження та прогнозування подій у розвитку. Велика увага при цьому скерована на розробку алгоритмів, що дозволяють розпізнавати об'єкти в режимі реального часу та працювати зі стрімінговими відеоданими;

4) використання 3D-зображень та обробка просторових даних: для деяких застосувань, наприклад у сфері віртуальної реальності, системи моніторингу об'єктів та опрацювання зображень використовують 3D-зображення та опрацювання просторових даних. Це дозволяє точніше моделювати об'єкти та їхню поведінку в тривимірному просторі (наприклад, тривимірні

зображення пошкоджень і дефектів залізничних колій);

5) забезпечення конфіденційності та безпеки: оскільки системи моніторингу об'єктів та обробки зображень працюють з чутливими даними, важливо забезпечити конфіденційність та безпеку цих даних. Розвиток технологій шифрування, методів анонімізації та захисту персональних даних стає все актуальнішим для захисту інформації, що опрацьовується системами моніторингу.

Ці тенденції вказують на швидкий розвиток систем моніторингу об'єктів та опрацювання зображень, який забезпечує нові можливості, зокрема, у сферах безпеки, медицини, транспорту, виробництва, військовій та багатьох інших.

Формулювання цілі статті

Напрацьований науково-дослідними групами кафедри радіоелектронних пристроїв та систем багаторічний досвід аналізу, розробки та впровадження різних методів дефектоскопії залізничних рейок і формування зображень з високою роздільною здатністю у широкому спектральному діапазоні оптичних хвиль, може бути використаний при розробленні нових сучасних телевізійних візуально-вимірювальних систем і методів високошвидкісного дослідження та аналізу стану залізничної колії, а також дотичної залізничної інфраструктури.

Моніторинг стану залізничних колій з використанням наземних транспортних засобів та високошвидкісних відеокамер

За останні кілька років на залізницях впроваджуються різноманітні системи відеоспостереження на основі відеокамер [1, 2, 7]. За функціональним призначенням ці системи можна розділити на чотири основні групи:

- а) системи для візуального контролю елементів колії;
- б) системи для візуального контролю поїзда;
- в) системи для технічного обслуговування та експлуатації;
- г) системи для забезпечення пасажирських перевезень.

Принцип дії автоматизованих телевізійних візуально-вимірювальних систем базується на використанні високошвидкісних відеокамер, які можуть формувати відеозображення колії під час руху транспортного засобу. Отримані зображення автоматично аналізуються спеціальним програмним забезпеченням для аналізу зображень. Програмний аналіз заснований на ідентифікації об'єктів і виявлених дефектів за допомогою методів крос-кореляції та вейвлет-перетворення, а дані класифікуються за допомогою схем керованого навчання і теорії нейронних мереж. Розпізнавання об'єктів за допомогою методів навчання на основі образів пов'язане з

обчислювальними проблемами. Для досягнення високої продуктивності в реальному часі, необхідно скоротити загальний час обчислень. За потреби виявити невеликі об'єкти, такі як дефекти на поверхні залізничних рейок, роздільна здатність сформованого відеозображення повинна бути високою, щоб забезпечити надійні дані для аналізу. Зі збільшенням роздільної здатності відеозображення збільшується кількість даних, які необхідно отримати, а також час обчислень, необхідний для аналізу. Як наслідок, швидкість інспекції необхідно скоригувати відповідно до швидкості опрацювання та аналізу даних [7].

Автоматизовані телевізійні візуально-вимірювальні системи можуть використовуватися для моніторингу та вимірювання геометрії головки рейки і відсотку її зносу, розривів колії, зміщення шпал, відсутності баласту (мінерального сипучого матеріалу між шпалою і поверхнею землі), стану опорних плит, відсутності кріпильних болтів і наявності пошкоджень поверхні тощо. Швидкість цих систем варіюється від 60 км/год до 320 км/год залежно від характеру перевірки та необхідної роздільної здатності отримуваних відеозображень. Наприклад, інспекція при виявленні зовнішніх деформацій залізничних рейок займає набагато менше часу, ніж інспекція при виявленні тріщин від прокатної контактної втоми (ПКВ). Однак, автоматизовані телевізійні візуально-вимірювальні системи поки не можуть бути використані для повної заміни інших, більш традиційних та поширених методів контролю, оскільки ці системи не дають повної інформації про наявність та стан внутрішніх дефектів [7].

Серед поширених у світі автоматизованих телевізійних візуально-вимірювальних залізничних систем залежно від використаного типу наземного транспортного засобу можна виокремити такі:

- системи з використанням рухомого складу потягів різних типів;
- системи з використанням автомотрис;
- системи з використанням автомобільних транспортних засобів різних типів.

Прикладом систем першого типу є транспортний засіб «IRIS 320», який використовує французька компанія Société Nationale des Chemins de fer Français (SNCF). Він оснащений високошвидкісними відеокамерами, за допомогою яких проводять інспекцію з метою виявлення дефектів поверхні швидкісних залізничних колій на швидкості до 320 км/год (рис. 1). Звичайні залізничні колії перевіряються на швидкості близько 160 км/год. Проводиться також візуальний аналіз геометричних параметрів колії: поздовжній рівень, поперечний рівень, викривлення тощо. Ці параметри вимірюються і контролюються через кожні 25 см довжини колії на швидкостях від 10 км/год до 320 км/год. Максимальна частота

оновлення зображення відеокамери складає 400 Гц (для швидкості руху транспортного засобу 320 км/год).

Подібні системи також розроблені та використовуються в Німеччині (Bildverarbeitungssysteme GmbH) та Італії (MERMEC) [7]. Особливістю цих систем є те, що вони здатні виконувати регулярний автоматизований візуальний огляд залізничних колій з точним і раннім виявленням дефектів, відсутності кріплень, шпал чи баласту, порушень геометрії із високою швидкістю обробки.



Рис. 1. Високошвидкісний потяг IRIS 320 та його автоматизована телевізійна візуально-вимірювальна система [7]

Для візуального контролю рейкових пар використовуються два різних набори відеокамер, розташованих над рейкою і збоку від неї (рис. 2). Відеокамери над рейкою формують зображення рейки паралельно поздовжній осі залізничної колії. Отримані зображення використовують для вимірювання відстані між кріпленням та основою рейки, перевірки електронного шаблону кріплення, вимірювання відстані між точкою з'єднання та рейкою, а також для виявлення зносу та тріщин рейок. Бічна відеокамера знімає зображення перпендикулярно до поздовжньої осі рейки, тобто в поперечному напрямку. З цього кута добре видно основу рейки і систему кріплення, а зображення допомагає виміряти відстань між анкерами і краями з'єднань для перевірки створеного електронного шаблону. Крім того, цей ракурс також використовується для виявлення місць відсутності болтів чи костилів, зношених або пошкоджених стрілочних переводів (рис. 3).

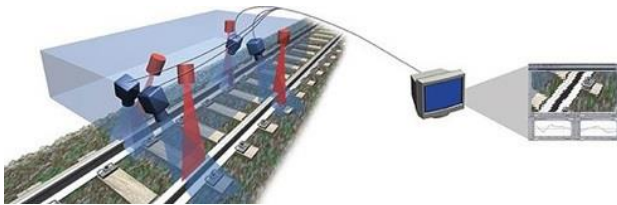


Рис. 2. Огляд залізничної колії з використанням автоматизованої візуально-вимірювальної системи [7]

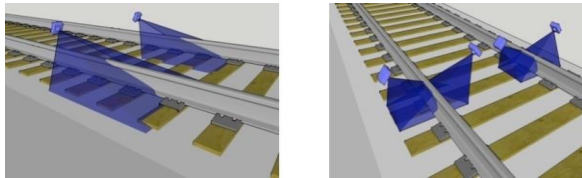


Рис. 3. Розташування камер візуального огляду залізничної колії: а) над колією (зліва); б) збоку від колії (справа) [7]

Більш універсальними та автономними мобільними залізничними засобами, що уніфіковані для виконання робіт з технічного контролю та діагностики залізничної інфраструктури, є автомотриси. При їх розробці та проектуванні застосовуються різні інноваційні технології, що суттєво підвищує ефективність використання спеціального рухомого складу та знижує енергозатрати. Автомотриси можуть працювати на швидкостях до 130 км/год та при суттєвих нахилах рейкового шляху, які, наприклад, є характерними для західних регіонів України.

Автоматизовані телевізійні візуально-вимірювальні системи на базі автомотрис для аналізу отриманих відеокameraми зображень на предмет наявності дефектів рейкової поверхні, стану шпал та стану рейкового полотна активно використовуються за кордоном. Це, наприклад, автоматизоване обладнання, яке встановлюється на автомотрисах відомої американської залізничної транспортної компанії SPERRY (рис. 4) [8].

Стабільний, повторюваний і послідовний контроль стану великих ділянок залізничної колії на достатньо високих швидкостях повинен водночас бути надійним, безпечним та комфортним, що дозволяє контролювати стан окремих елементів залізничних рейок і шпал. Для цього часто використовують автомобільні транспортні засоби, обладнані відповідними спеціальними системами технічного зору. Такі системи можуть оглядати до 70 000 шпал протягом однієї години руху зі швидкістю 50 км/год, а за день – кілька сотень кілометрів колії.



Рис. 4. Автомотриса SRS 141 виробництва SPERRY та автоматизована телевізійна візуально-вимірювальна система [8]

Прикладом такого автомобільного транспортного засобу для автоматизованого візуального контролю залізничної колії є пікап виробництва компанії Nagle Research (Остін, Техас), оснащений високошвидкісною 3D-відеосистемою Sick Ranger, який пересувається залізничними коліями зі швидкістю 50 км/год та формує відеозображення колії по всій ширині шпал (2,7 м), зокрема і за межами рейкової ділянки шляху, з роздільною здатністю 1 мм по кожній осі спостереження. Проводиться також точна перевірка наявності та стану дерев'яних і бетонних шпал, костилів, анкерів і з'єднувальних пластин, а також дослідження геометричних характеристик шпал та ширини колії (віддалі між рейками) і визначення рівня зношення опорної поверхні рейок (рис. 5). Міжнародна офіційна назва цієї системи відеоконтролю колії – Aurora Georgetown Rail [9].



Рис. 5. Транспортний засіб для візуального огляду Aurora [9]

Nagle Research також розробила для користувачів аналітичний програмний пакет, який може опрацьовувати гігабайти даних і створювати детальні звіти зі значеннями для більше, ніж десять різних параметрів шпал (рис. 6). Пакет дозволяє користувачам отримувати 3D-зображення будь-якої шпали, якщо є якісь сумніви щодо її стану. Повні звіти є доступними вже протягом 48 годин після обстеження і надають детальну інформацію про опору, викривлення, напрямок і положення шпали за допомогою системи глобального позиціонування GPS, стан окремих рейкових стиків і точок кріплення шпал, стан зносу рейкової основи окремих шпал або груп шпал, нахил рейки, відстань між шпалами, стан шару під рейкою та стан покриття кистилів [9].

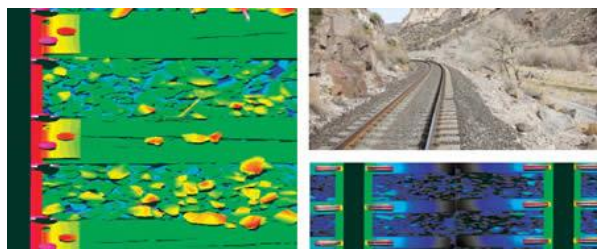


Рис. 6. Візуалізація результатів дослідження залізничної колії [9]

Моніторинг залізничної колії з використанням безпілотних літальних апаратів та високошвидкісних відеокамер

За останні кілька років великі залізничні компанії почали впроваджувати інноваційні рішення на основі безпілотних технологій для моніторингу та діагностики залізничної

інфраструктури, боротьби з крадіжками та вандалізмом, забезпечення охорони, безпеки та вирішення різних проблем, пов'язаних із залізницею. Безпілотні літальні апарати (БПЛА), оснащені високошвидкісними відеокамерами, збирають інформацію та, базуючись на результатах подальшого аналізу, можуть бути використані для підвищення безпеки та захисту і зменшення операційних витрат найбільших світових залізничних компаній більш ніж на 20 % [10-12].

Наймасштабніші програми впровадження та використання БПЛА на залізниці реалізовані: в компанії Deutsche Bahn (Німеччина) у 2013 році для боротьби з вандалізмом у приміському залізничному сполученні за допомогою БПЛА, що оснащені відеокамерами; в компанії PKP Cargo (Польща) у 2014 році для зниження кількості крадіжок вантажів та елементів інфраструктури на залізниці; в компанії Network Rail (Великобританія) для перевірки стану колії та підтримуючих конструкцій внаслідок впливу ерозії та руйнувань після підтоплень і паводків поблизу річок та на узбережжі Ла-Манша; в компанії SNFC (Франція), яка починаючи з 2015 року робить ставку на використання БПЛА для огляду та обслуговування залізничної інфраструктури, підвищення безпеки та надійності залізничних мереж, зокрема у гірській місцевості, екологічної безпеки, створення карт розташування небажаної рослинності земельного полотна залізничної колії; в компанії BNSF Railway (США) починаючи з 2015 року впроваджений моніторинг за допомогою БПЛА понад 32,5 тисяч миль залізничної колії для оцінки стану безпеки інфраструктури, зокрема і наземних частин залізничних мостів (прольотів, опор, тросового навісу) [10-12].

Можливі шляхи використання БПЛА в залізничній галузі України це:

- 1) зменшення фінансових та матеріальних витрат через крадіжки елементів залізничної інфраструктури, майна та вантажів;
- 2) розслідування обставин аварій залізничного транспорту;
- 3) моніторинг об'єктів залізничної інфраструктури з метою запобігання пошкодженням та втраті елементів колії і засобів сигналізації та зв'язку [10-12].

БПЛА важко почути у повітрі, вони є практично безшумними та не заважають мешканцям ближніх населених пунктів та довкіллю, їх також важко виявити через невеликі розміри (рис. 7). Вони можуть бути також оснащені високоякісними тепловізійними відеокамерами для роботи вночі та за несприятливих погодних умов, що дозволяє виявляти підозрілі об'єкти в будь-який час доби та

за будь-яких кліматичних умов на відстані понад один кілометр.



Рис. 7. Огляд залізничної колії за допомогою БПЛА [10-12]

БПЛА також все частіше використовують для розслідування залізничних аварій та інцидентів, коли близькість дерев і повітряних проводів обмежує використання інших повітряних транспортних засобів (наприклад, гелікоптерів) для отримання відеозображень з місця події.

Отже, використання БПЛА для збору важливих даних в небезпечних для життя людей умовах (гірська місцевість, осередок вогню, підтоплена місцевість, забруднена небезпечними хімічними речовинами місцевість тощо) значно знижує ризик при залученні працівників до розслідування причин аварій. Окрім того, це дешевше, ніж залучати гелікоптер та суттєво дешевше, ніж використання наземних бригад.

БПЛА, оснащені високошвидкісними відеокамерами, можуть здійснювати дистанційну інспекцію залізничних ліній, що рідко використовуються або простоюють, та запобігати крадіжкам елементів колії, а також діагностувати дефекти та пошкодження конструктивних елементів залізничних мостів і тунелів (в Україні є їх велика кількість). Окрім того, моніторинг за допомогою БПЛА не створює додаткових перешкод для руху поїздів та інших залізничних транспортних засобів, оскільки він не потребує вільної колії для збору даних, як інші засоби виявлення дефектів. Отже, моніторинг за допомогою БПЛА є значно ефективнішим та більш економічно вигідним.

Метод обстеження та аналізу стану залізничної колії за допомогою БПЛА є гнучким, оскільки дозволяє проводити відеореєстрацію на різних висотах і в умовах складного рельєфу, де інші методи обстеження не можуть бути використані (рис. 8). Таким чином, аерофотозйомка з БПЛА надає більше корисної інформації для аналізу.

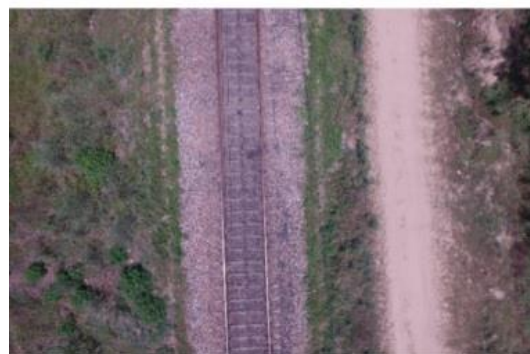


Рис. 8. Розташування БПЛА над залізничною колією при аерофотозйомці [10-12]

Дані, отримані з БПЛА, проходять різні етапи попереднього та подальшого опрацювання. Основними етапами опрацювання є:

- 1) розрахунок відстані до наземних об'єктів;
- 2) виокремлення окремих кадрів з відеозапису;
- 3) гаусове згладжування для видалення шуму зображення;
- 4) виокремлення потрібних ділянок зображення кольором у кольоровому просторі HSV;
- 5) перетворення зображення з кольорового простору RGB у відтінки сірого;
- 6) виявлення границь і контурів ділянок колії при вимірюваннях геометричних параметрів колії за різних погодних умов і на різних висотах відеозйомки.

До недоліків моніторингу за допомогою БПЛА можна віднести обмежений час польоту через постійну необхідність додаткової підзарядки акумуляторів та обмежену кількість досвідчених операторів, які можуть керувати БПЛА.

Наразі безпілотні технології в Україні розвиваються дуже швидкими темпами. З часом БПЛА будуть ще ефективнішими у сфері безпеки, боротьбі з вандалізмом, обслуговуванні залізничної інфраструктури та діагностики її стану.

Залізничні системи моніторингу колій з використанням технологій машинного зору та нейронних мереж

Зараз у всьому світі спостерігається великий інтерес до систем машинного зору та пов'язаних із ними технологій. Основна перевага цих систем

полягає в тому, що вони можуть вирішувати багато рутинних завдань і автоматизувати ручну роботу [13-16].

Машинний зір – це сукупність інженерних методів, які дозволяють комп'ютерному обладнанню “бачити” за допомогою відеокамер. Сьогодні машинний зір є невід'ємною складовою багатьох автоматизованих процесів і використовується для контролю якості різної продукції та підвищення продуктивності багатьох виробничих процесів.

Одним із провідних світових виробників обладнання для машинного зору та промислової ідентифікації є американська компанія Cognex (рис. 9). Широкий асортимент продукції Cognex використовують провідні світові виробники та постачальники обладнання для систем машинного зору:

- 1) автономні системи машинного зору;
- 2) відеосенсори;
- 3) тривимірні системи машинного зору з декількома відеокамерами [13].



Рис. 9. Пристрої машинного зору Cognex [13]

Застосування машинного зору у транспортній сфері є дуже різноманітним: ідентифікація номерних знаків транспортних засобів; підрахунок кількості людей у транспортному засобі тощо. Відомі зарубіжні компанії, такі як Siemens, Rio Tinto і General Electric, беруть активну участь у впровадженні та розвитку систем машинного зору на залізничному транспорті. Ці компанії пропонують системи, що дозволяють здійснювати автоматичний візуальний контроль стану залізничної колії, моніторинг технічного стану залізничних систем в режимі реального часу та автоматизацію руху автономних локомотивів. Машинний зір також має велике значення для підвищення безпеки руху шляхом вдосконалення існуючих систем автоматичної локомотивної сигналізації. Оснащення тягових локомотивів технологією машинного зору дозволить їм “бачити” колійні сигнали, а методи візуального аналізу, засновані на технології нейронних мереж, зможуть визначати показання сигналів.

Основне завдання систем машинного зору – аналіз зображень і відеопотоків. У роботі систем машинного зору можна виокремити три основні операції:

- 1) отримання (захоплення) зображень;
- 2) опрацювання та аналіз зображень;
- 3) передача всіх результатів опрацювання в систему управління технологічним процесом.

Набір завдань, що вирішуються системами машинного зору, можна розділити на чотири групи (рис. 10):

- 1) *розпізнавання положення* – визначення просторового положення об'єкта за зовнішньою системою координат або за внутрішньою системою координат, пов'язаною зі статичним об'єктом (початок координат знаходиться всередині об'єкта), і передача інформації про положення об'єкта і його просторову орієнтацію в систему управління та зберігання даних;
- 2) *вимірювання* – відеокамера вимірює різні фізичні параметри об'єкта (лінійний розмір, діаметр, кривизна, площа, висота, кількість тощо);
- 3) *інспекція* – підтвердження або спростування певних характеристик об'єкта (наприклад, наявність дефектів на його поверхні чи всередині);
- 4) *ідентифікація* – зчитування різних кодів (наприклад, штрих-кодів, 2D-кодів, тощо) за допомогою відеокамери та їх розпізнавання або визначення різних буквено-цифрових позначень. Крім того, до завдань цієї групи відносяться безпекові: ідентифікація осіб, техніки та обладнання, визначення руху тощо.



Рис. 10. Завдання, які розв'язуються системами машинного зору [14-16]

У системах машинного зору при вирішенні вищевказаних завдань, використовуються такі методи опрацювання зображень [13-16]:

- *лічильник пікселів*: підраховується кількість світлих і темних пікселів зображення;
- *виокремлення зв'язних областей*: зв'язні області зображення є, з одного боку, типом об'єкта, дуже тісно пов'язаного з растровим зображенням, і, в той же час, самостійною одиницею, що дозволяє проводити геометричний, логічний, топологічний та будь-який інший аналіз зображення;

- *бінаризація*: перетворює зображення у відтінках сірого у бінарне (містить лише білі та чорні пікселі);
- *гістограмування*: характеризує частоту пікселів однакової яскравості на зображенні;
- *сегментація*: використовується для пошуку та підрахунку деталей на зображенні шляхом його поділу на різні за певною ознакою області. Вважається, що область відповідає реальному об'єкту або його частині, а межі області відповідають межах об'єкта;
- *зчитування штрих-коду*: декодування одновимірних або двовимірних кодів, призначених для автоматичного зчитування або сканування;
- *оптичне розпізнавання символів*: автоматичне зчитування тексту, наприклад, транспортних серійних номерів;
- *вимірювання розміру об'єкта* в дюймах або міліметрах;
- *зіставлення шаблонів*: пошук, зіставлення та підрахунок певних шаблонів;
- *інваріантні алгоритми виявлення* та співставлення особливостей точок на зображенні;
- *методи ідентифікації особи* за райдужною оболонкою ока або відбитками пальців;
- *різні методи відновлення форми об'єкта* за зображенням.

У багатьох випадках системи машинного зору комбінують ці методи обробки у певній послідовності, щоб виконати повну перевірку чи низку завдань.

Типова залізнична система машинного зору повинна складатися з однієї чи декількох цифрових або аналогових відеокамер (чорно-білих або кольорових) з відповідною оптикою для отримання відеозображення, системи освітлення об'єкта або цілі (рис. 11) та додаткових пристроїв введення/виведення або каналів зв'язку для генерації і передачі отриманих результатів (не зображені на рисунку). Для формування, опрацювання та аналізу отриманих відеозображень використовується спеціалізоване програмне забезпечення [13-16].

Матриця фоточутливих елементів у сучасних відеокамерах призначена для створення цифрового відеозображення. До її складу входять аналого-цифрові перетворювачі, які перетворюють величину інтенсивності світлового потоку від кожного елемента матриці у цифрове значення (CCD, CMOS). За способом просторової візуалізації зображення, отриманого камерою, розрізняють такі типи камер: однорядкові камери (1D); двовимірні монохромні чи кольорові для формування кадру зображення (2D); для формування тривимірного зображення об'єкта або цілі (3D).

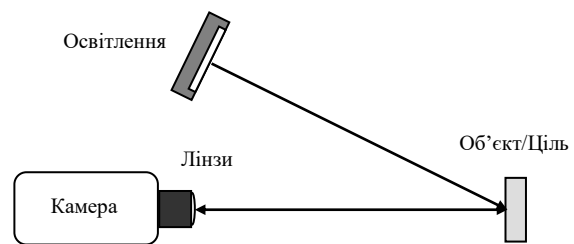


Рис. 11. Типова структура залізничної системи машинного зору [14-16]

Об'єктив забезпечує фокусування відеокамери на певній відстані і отримання чіткого зображення контрольованого об'єкта. Якщо контрольований об'єкт розташований за межами фокусної відстані, зображення буде розмитим (нечітким), а можливість його опрацювання погіршиться.

Освітлення – ще одна важлива частина системи машинного зору. Використання різних методів освітлення дозволяє системам машинного зору значно розширити спектр виконуваних ними завдань. Існуючий рівень розвитку світлодіодних технологій гарантує тривалий термін служби і низьке енергоспоживання системи машинного зору при високій яскравості освітлення.

Зображення, сформовані відеокамерою чи відеокамерами, надсилаються на пристрій захоплення кадрів або в пам'ять комп'ютера. Пристрій захоплення кадрів – це пристрій, який перетворює вихідний сигнал з відеокамери в цифровий формат (зазвичай, двовимірний масив чисел), що дозволяє зберігати зображення в пам'яті комп'ютера і опрацьовувати їх за допомогою спеціального програмного забезпечення для машинного зору.

Зазвичай, програмне забезпечення виконує кілька етапів обробки зображень. У багатьох випадках зображення спочатку опрацьовується для видалення або зменшення шуму чи перетворення його відтінків сірого на просту комбінацію чорного та білого (бінаризація). Після первинного опрацювання програмне забезпечення обчислює, вимірює та ідентифікує об'єкти, розміри, дефекти та інші характеристики на зображенні. На завершальному етапі програма робить остаточний висновок про наявність або відсутність дефектів у досліджуваному об'єкті і надсилає оператору попереджувальний сигнал. Більшість залізничних систем машинного зору базуються на використанні чорно-білих відеокамер, але використання кольорових відеокамер також набуває поширення. Крім того, системи машинного зору все частіше застосовують цифрові відеокамери прямого під'єднання без пристрою захоплення кадрів, що знижує витрати і спрощує систему.

Прикладами реальних працюючих систем машинного зору на залізниці є низка дослідницьких проєктів, реалізованих

Університетом штату Іллінойс в Урбана-Шампейн (UIUC) у співпраці з Асоціацією американських залізниць (AAR), компанією BNSF Railway, центром NEXTRANS та науково-дослідною радою з питань транспорту (TRB) у рамках програми розвитку високошвидкісних залізниць IDEA [17].

Використання технологій нейронних мереж у дефектоскопії залізничних колій є актуальним напрямком досліджень та розробок [18, 19]. Нейронні мережі можна використати для автоматичного візуального виявлення та відеоаналізу серій зображень дефектів на залізничних рейках, що дозволяє забезпечити швидше та точніше виявлення проблемних ділянок (рис. 12).



Рис. 12. Автоматизований відеоаналіз отриманих серій зображень залізничної колії та рухомого складу вагона [17]

Основним завданням дефектоскопії залізничних колій є виявлення тріщин, пошкоджень, зламів, зношеності та відсутності окремих елементів колій, що може суттєво вплинути на безпеку руху поїздів. Найбільш поширені методи дефектоскопії, такі як магнітний контроль, ультразвуковий контроль, звичайний візуально-оптичний контроль та інші, є дуже витратними з точки зору часу та праці операторів, а також суб'єктивними залежно від досвіду оператора. Застосування нейронних мереж дозволить забезпечити автоматизацію процесу виявлення дефектів і покращити його ефективність. Нейронні мережі можуть бути навчені розпізнавати шаблони дефектів на основі великої кількості вхідних даних, таких як зображення та відповідні сигнали, зібрані з різних давачів. Процес навчання повинен містити такі кроки:

1) збір навчального набору даних, для чого необхідно зібрати велику кількість зображень рейок, які містять різні типи дефектів і бездефектні ділянки. Ці зображення слід анотувати, тобто вказати точне місце розташування та тип кожного дефекту на зображенні;

2) попереднє опрацювання даних, при якому всі зображення можуть бути піддані попередньому опрацюванню, такому як зменшення розміру, нормалізація кольорів, фільтрація шуму тощо, щоб покращити якість вхідних даних для нейронної мережі;

3) вибір необхідної архітектури нейронної мережі, яка буде ефективно працювати з візуальними даними. Наприклад, можливе

використання згорткової нейронної мережі (Convolutional Neural Network – CNN), яка добре зарекомендувала себе у завданнях опрацювання зображень [18, 19];

4) навчання моделі нейронної мережі за допомогою навчального набору даних. Це включає передавання вхідних зображень через цю мережу, обчислення вихідних значень та порівняння їх з правильними результатами. При цьому застосовуються різні алгоритми оптимізації, такі як зворотне поширення помилки (Backpropagation), для оновлення вагових коефіцієнтів моделі;

5) валідація та тестування моделі після навчання перевіряє її ефективність за допомогою валідаційного набору даних. Потім можна протестувати модель на нових невикористаних раніше зображеннях рейок, щоб оцінити її загальну точність та продуктивність.

Після навчання відповідна нейронна мережа може бути використана для аналізу нових зображень або сигналів і автоматичного виявлення дефектів. Такий підхід може значно полегшити та пришвидшити процес візуальної діагностики дефектів залізничних колій, зокрема і телевізійними методами, забезпечуючи більш об'єктивний та ефективний аналіз даних. При цьому нейронну мережу можна програмно інтегрувати з дефектоскопічними пристроями або можна використовувати окремо для опрацювання зібраних раніше даних. Це дозволить забезпечити швидко та об'єктивну комплексну оцінку стану залізничних колій.

Основні переваги використання нейронних мереж у телевізійній дефектоскопії залізничних колій:

1) автоматизація процесу виявлення дефектів, що зменшує залежність від оператора та сприяє забезпеченню стабільно високої якості оцінки дефектів;

2) висока швидкість опрацювання даних, що дозволяє здійснювати аналіз стану залізничних колій навіть у реальному часі;

3) покращена точність виявлення дефектів завдяки використанню глибоких нейронних мереж, які можуть виявляти складні шаблони та аномалії;

4) можливість інтеграції з іншими системами моніторингу та управління залізницею, що сприяє підвищенню рівня безпеки руху та оптимізації планування обслуговування залізничних колій.

Хоча використання нейронних мереж у телевізійній дефектоскопії залізничних колій має багато переваг, воно потребує належного навчання та валідації моделей, а також інтеграції з існуючими системами та процедурами дефектоскопії. Проте з розвитком технологій машинного навчання та зростання доступності даних, цей напрямок має великий потенціал для

підвищення ефективності та безпеки залізничного транспорту.

Висновки

Підвищення попиту на ефективний високошвидкісний моніторинг залізничної інфраструктури змусило розробників вдосконалювати відомі системи діагностики та розробляти принципово нові, до яких, зокрема, відносяться телевізійні системи моніторингу на основі комп'ютерного та машинного зору з використанням нейронних мереж. Роздільна здатність сучасних телевізійних систем дозволяє отримати не тільки панорамне зображення усієї досліджуваної ділянки залізничної колії, але й деталізоване зображення окремих її структурних елементів (анкери, костилі, стяжні пластини, стрілкові переводи, рейкові стики тощо), що забезпечує їх розрізнення та ідентифікацію.

Можливість збору, збереження, упорядкування та архівування великих обсягів візуальних даних, їх довільного зчитування з пам'яті у будь-який момент часу для подальшого комп'ютерного опрацювання та аналізу зображень, зокрема з отриманням кількісної оцінки, дозволяє визначати не тільки наявні дефекти, але й тенденції зміни стану залізничної колії та її інфраструктури у часі, на відміну від традиційних методів дефектоскопії.

Список використаних джерел

1. Нічога В. Результати розроблення та дослідження інформаційно-діагностичної системи для магнітодинамічної дефектоскопії рейок / Віталій Нічога, Володимир Сторож, Юрій Матієшин // Вісник НУ "Львівська політехніка" – Радіоелектроніка та телекомунікації. – 2019. – № 914. – С. 65-74.
2. [Vitalij Nichoha](#), [Volodymyr Storozh](#) and [Yurij Matiieshyn](#). "Results of the development and research of information-diagnostic system for the magnetic flux leakage defectoscopy of rails", 2020 IEEE 15th International Conference on Advanced Trends in Radioelectronics, Telecommunications and Computer Engineering (TCSET'2020), Proceedings of the International Conference, Lviv-Slavske, Ukraine, February 2020, pp. 852-857, doi: 10.1109/TCSET49122.2020.235557.
3. [Vitalij Nichoha](#), [Volodymyr Storozh](#) and [Yurij Matiieshyn](#). "Results of research of the eight-channel sensor for the defectoscopy of railway rails", Proceedings of SPIE 11442, Radioelectronic Systems Conference 2019, 114421A (11 February 2020); URL: <https://doi.org/10.1117/12.2565748> (09.07.2024).
4. Y. Matiieshyn, V. Minziuk, and S. Mankovskyy. "Algorithmic support of the television scanning optical microscope in the study of microobjects", 2019 IEEE IVth International Conference on Information and Telecommunication Technologies and Radio Electronics (UkrMiCo'2019), Proceedings of the International Conference, Odessa, Ukraine, 9-13 September 2019, pp. 1-6, doi: 10.1109/UkrMiCo47782.2019.9165398.
5. I. Prudyus, V. Tkachenko, L. Lazko and S. Fabirovskyy. "Sub-pixel Based Forming of High-Resolution Images", Przegląd Elektrotechniczny (Electrical Review), vol. 7, 2015, pp. 45-48, doi: 10.15199/48.2015.07.15.
6. A. Hryvachevskiy, I. Prudyus, L. Lazko and S. Fabirovskyy. "Methods of multispectral image fusion at the pixel level", 2018 IEEE 14th International Conference on Advanced Trends in Radioelectronics, Telecommunications and Computer Engineering (TCSET'2018), Proceedings of the International Conference, Lviv-Slavske, Ukraine, February 2018, pp. 102-107, doi: 10.1109/TCSET.2018.8336165.
7. INNOTRACK (Innovative Track Systems) D4.4.1 – Rail Inspection Technologies [Text], Integrated Project no. TIP5-CT-2006-031415, University of Birmingham (Great Britain), 2008, 42 p.
8. Sperry Rail Inc., 2023. SPERRY [Електронний ресурс]. – URL: <https://www.sperryrail.com/> (09.07.2024).
9. Simmons-Boardman Publishing Inc., 2023. Railway Age [Електронний ресурс]. – URL: <https://www.railwayage.com/cs/aurora-the-next-generation/> (09.07.2024).
10. F. Flammini, C. Pragliola and G. Smarra. "Railway infrastructure monitoring by drones", International Conference on Electrical Systems for Aircraft, Railway, Ship Propulsion and Road Vehicles & International Transportation Electrification Conference (ESARS-ITEC'2016), Proceedings of the International Conference, Toulouse, France, 2016, pp. 1-6, doi: 10.1109/ESARS-ITEC.2016.7841398.
11. O.I. Chumachenko, A.V. Gilevoy. "Image processing in UAV", 2013 IEEE 2nd International Conference on Actual Problems of Unmanned Air Vehicles Developments (APUAVD'2013), Proceedings of the International Conference, Kiev, Ukraine, 2013, pp. 75-76, doi: 10.1109/APUAVD.2013.6705287.
12. A.K. Singh, A. Swarup, A. Agarwal, D. Singh. "Vision based rail track extraction and monitoring through drone imagery", ICT Express, 2019, vol. 5, issue 4, pp. 250-255.
13. COGNEX, 2023. Products [Електронний ресурс]. – URL: <https://www.cognex.com/ru/products> (09.07.2024).

14. Минаков В.А. Технология машинного зрения на локомотивах для идентификации путевых сигналов / В.А. Минаков, В.К. Фоменко // Мир транспорта. – 2019. – т. 17. – № 6. – С. 62-72.
15. Хабр, 2018. Машинное зрение [Електронний ресурс] – URL: <https://habr.com/ru/articles/350918/> (09.07.2024).
16. Лысенко О. Машинное зрение от SICK/IVP // Компоненты и технологии. – 2007. – № 1.
17. Machine Vision Inspection of Railroad Track // USDOT Region V Regional University Transportation Center Final Report (NEXTRANS Project No. 0281Y02). – University of Illinois at Urbana Champaign and Purdue University, January 10, 2011.
18. Saturn Cloud, 2023. A Comprehensive Guide to Convolutional Neural Networks – the ELI5 way [Електронний ресурс]. – URL: <https://saturncloud.io/blog/a-comprehensive-guide-to-convolutional-neural-networks-the-eli5-way/> (09.07.2024).
19. Коц И.Н., Лысенко И.Е., Полякова В.В., Ковалев А.В. Методы диагностики инженерных объектов на основе нейросетей // ИВД. 2020, №8 (68). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/metody-diagnostiki-inzhenernyh-obektov-na-osnove-neyrosetey> (09.07.2024).

Storozh Volodymyr, Nykolyshyn Myron, Matiieshyn Yuriy, Mankovskyy Spartak. Use of Television Methods in Rapid Diagnostics of Defects of the Railway Tracks

Abstract. The work carried out a detailed analysis of foreign and domestic information sources on issues related to the use of television visually measuring systems, means and methods for rapid diagnosis of railway tracks defects, as well as assessment of the state of the relevant railway infrastructure. A comparative analysis of the main technical parameters and characteristics of considered systems was carried out. The concept of automated television visually measuring systems is based on the use of a high-speed video camera capable of capturing video images of the rail track as the vehicle moves over it. Captured images are then automatically analysed using dedicated image analysis software. The software analysis is based on the identification of objects or defects detected using cross-correlation and wavelet transform mathematical methods. Special attention is paid to the use of machine vision technologies and neural networks to increase the automation of obtaining and processing the results of diagnostics of railway tracks defects by television methods. Neural networks can be used for automatic visual detection and video analysis of series of images of defects on railway tracks, allowing for faster and more accurate detection of problem areas. Training a neural network

model using a training dataset involves feeding input images through the network, calculating output values, and comparing them to the correct results. Various optimization algorithms, such as backpropagation, are used to update the model's weights. Validation and testing of the model after training checks its performance using a validation dataset. The model can then be tested on new, previously unused rail images to assess its overall accuracy and performance. After training, the corresponding neural network can be used to analyse new images or signals and automatically detect defects.

Keywords: Television Methods; Defectoscopy; Railway Track.

Сторож Володимир Георгійович, кандидат технічних наук, доцент кафедри радіоелектронних пристроїв та систем інституту телекомунікацій, радіоелектроніки та електронної техніки, Національного університету «Львівська політехніка», Львів, Україна. E-mail: volodymyr.h.storozh@lpnu.ua. ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-4776-2729>.

Николішин Мирон Йосипович, кандидат технічних наук, доцент кафедри радіоелектронних пристроїв та систем інституту телекомунікацій, радіоелектроніки та електронної техніки, Національного університету «Львівська політехніка», Львів, Україна. E-mail: myron.y.nykolyshyn@lpnu.ua. ORCID ID: <https://orcid.org/0009-0001-3526-6728>.

Матієшин Юрій Миколайович, кандидат технічних наук, доцент кафедри радіоелектронних пристроїв та систем інституту телекомунікацій, радіоелектроніки та електронної техніки, Національного університету «Львівська політехніка», Львів, Україна. E-mail: yurii.m.matiieshyn@lpnu.ua. ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-8498-3398>.

Маньковський Спартак Вікторович, кандидат технічних наук, старший викладач кафедри радіоелектронних пристроїв та систем інституту телекомунікацій, радіоелектроніки та електронної техніки, Національного університету «Львівська політехніка», Львів, Україна. E-mail: spartak.v.mankovskyi@lpnu.ua. ORCID ID: <https://orcid.org/0009-0008-5217-6290>.

Storozh Volodymyr Georgiyovych, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Radioelectronic Devices and Systems, Institute of Telecommunications, Radioelectronics and Electronic Engineering, Lviv Polytechnic National University, Lviv, Ukraine. E-mail: volodymyr.h.storozh@lpnu.ua. ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-4776-2729>.

Nykolyshyn Myron Yosypovych, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Radioelectronic Devices and Systems,

Institute of Telecommunications, Radioelectronics and Electronic Engineering, Lviv Polytechnic National University, Lviv, Ukraine. E-mail: myron.y.nykolyshyn@lpnu.ua.

ORCID ID: <https://orcid.org/0009-0001-3526-6728>.

Matiieshyn Yuriy Mykolayovych, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Radioelectronic Devices and Systems, Institute of Telecommunications, Radioelectronics and Electronic Engineering, Lviv Polytechnic National University, Lviv, Ukraine. E-mail:

yurii.m.matiieshyn@lpnu.ua.

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-8498-3398>.

Mankovskyi Spartak Viktorovych, Candidate of Technical Sciences, Senior Lecturer of the Department of Radioelectronic Devices and Systems, Institute of Telecommunications, Radioelectronics and Electronic Engineering, Lviv Polytechnic National University, Lviv, Ukraine. E-mail:

spartak.v.mankovskyi@lpnu.ua.

ORCID ID: <https://orcid.org/0009-0008-5217-6290>.

ПЕТРЕНКО Т.Г., к.т.н., доцент, доцент кафедри інформаційних технологій, Український державний університет залізничного транспорту
ЗАДОРЖНИЙ А.Ю., аспірант, Український державний університет залізничного транспорту

Підготовка метеорологічних даних для навчання моделі штучного інтелекту

Прогнозування метеоумов за допомогою сучасних моделей штучного інтелекту потребує попередньої обробки великої кількості даних різних типів. Перед використанням метеоданих для навчання моделей, метеодані мають бути зібрані, об'єднані та структуровані. У статті розглянута підготовка метеоданих для подальшого використання при навчанні графових нейронних мереж з метою прогнозування метеоумов - визначення джерел історичних метеоданих, засобів збору даних, обробки та зберігання у базі даних. Описано властивості метеоресурсів даних вільного використання, з яких здійснюється збір метеоданих, а також підхід до підготовки даних щодо використання. Особлива увага приділяється аспектам забезпечення різноманітності даних для забезпечення навчання моделей штучного інтелекту та росту прогностичних можливостей моделей. Наведено розрахунок статистичних характеристик метеопоказнику «температура» засобами Python. Запропоновано використання бази даних MongoDB Atlas для збереження різноманітних метеоданих.

Ключові слова: API метеоресурсів, попередня обробка метеоданих, статистичний аналіз, бібліотеки Python, MongoDB Atlas

Вступ

Прогнозування метеоумов є однією з важливих задач людства, оскільки певні очікування безпосередньо впливають на людське життя та діяльність.

Метеорологічні дані можуть бути отримані із різних джерел. Дані можуть мати різні формати, масштаби та часові інтервали. Наприклад, поточні дані, отримані з локальних метеорологічних станцій, можуть мати високу просторову роздільність, але бути обмеженими за часовими рамками, тоді як супутникові дані можуть покривати великі території, але з меншою просторовою роздільністю. Різноманітність даних метеоумов призводить до неструктурованості сирих метеоданих. Структурування сирих чисельних даних дозволяє подальше використання методів Машинного Навчання (Machine Learning, ML) для аналізу даних, але призводить до часткового втрачання різноманітності.

Історичні метеодані повинні бути зібрані та оброблені засобами, які зберігають різноманітність даних за рахунок перетворення даних у напівструктуровану форму. Далі перетворені дані можна використовувати для прогнозування за допомогою сучасних методів ML. Обробка метеоданих включає етапи очистки сирих даних, перетворення і нормалізації, щоб забезпечити

© ПЕТРЕНКО Т.Г., ЗАДОРЖНИЙ А.Ю. 2024

сумісність даних з сучасними методами прогнозування. Метеодані повинні зберігатися в спеціалізованих базах даних, які забезпечують швидкий доступ до великих обсягів інформації різного типу і дозволяють постійне оновлення для покращення моделей.

У статті розглядаються джерела отримання історичних метеоданих вільного використання з сайтів мережі Internet, засоби виявлення тенденцій в метеоданих та обґрунтовано вибір та створення бази даних для зберігання метеоданих. Виконано структурний опис базових параметрів чисельних метеоданих, умов отримання метеоданих та запропоновано алгоритм визначення зовнішнього джерела метеоданих, дані якого відповідають суттєвим властивостям метеоданих за певною геолокацією. Запропонований підхід є першим кроком і для формування синтетичних даних для навчання графових нейронних мереж (Graph Neural Networks, GNNs), які мають властивості близькі до оригінальних даних, але не мають обмежень притаманних оригінальним даним.

Постановка проблеми, аналіз досліджень та публікацій

Проблемою використання історичних метеоданих при навчанні методів ML є незадовільна попередня обробка метеоданих.

Попередня обробка даних має вирішальне значення для результативності навчання GNN з метою покращення прогнозування метеоумов.

Якісні прогнози погоди в основному базуються на методах Чисельного Прогнозування Погоди (Numerical Weather Prediction, NWP) [1]. NWP використовує складні математичні моделі, які описують динаміку атмосфери, океанів та поверхневих процесів. Чисельні моделі потребують великої кількості даних, які отримані в різних точках земної кулі. Метеодані збираються за допомогою супутників, метеорологічних станцій, радарів і літаків. Наступна обробка даних виконується в хмарних сховищах на суперкомп'ютерах і забезпечує відносно точні прогнози, але розрахунки є надзвичайно ресурсомісткими та дорогими.

Швидкий розвиток Штучного Інтелекту (Artificial Intelligence, AI), особливо методів ML, забезпечив появу нових підходів до прогнозування метеоумов, що потенційно можуть зробити процес прогнозування менш затратним і більш точним [2].

Одним із найбільш перспективних напрямків є застосування глибоких нейронних мереж, зокрема GNN [3,4]. GNNs моделі можуть краще відображати складні просторові та часові взаємодії між різними компонентами кліматичної системи, що дозволяє покращити точність прогнозів.

Однак, критичною передумовою для успішного застосування GNNs у прогнозуванні є наявність великої кількості якісних даних про минулі метеоумови. Сучасні засоби обробки даних дозволяють використання метеоданих різного ступеню структурованості [5-8].

Історичні метеодані також відіграють важливу роль у тренуванні та вдосконаленні моделей AI, оскільки вони дають змогу не тільки навчити систему розпізнавати певні закономірності та тенденції в метеоумовах (патерни), що можуть виникати за різних кліматичних сценаріїв, а і покращувати якість прогнозу.

Джерела історичних погодних даних включають глобальні метеорологічні бази даних, такі як бази даних Європейського центру середньострокових прогнозів погоди (European Centre for Medium-Range Weather Forecasts, ECMWF) [9] та Національного управління океанічних і атмосферних досліджень США (National Oceanic and Atmospheric Administration, NOAA) [10]. Історичні метеодані можуть охоплювати періоди від кількох десятків до сотень років і включати різноманітні параметри, які відображають погодні явища на різних рівнях атмосфери. Доступність метеоданих з відкритих метеоресурсів сайтів метеокомпаній відкриває можливість отримання великої кількості даних за допомогою Програмного Інтерфейсу Додатка (Application

Programming Interface, API) [11], які на певному етапі обробки даних можна вважати сирими.

Реально сирими даними є метеодані, які отримані як результат моніторингу із локальних метеостанцій. Агрегація різноманітних метеоданих як із зовнішніх, так і локальних джерел [4], потребує розміщення даних в спеціальних базах даних [6-8].

Підготовка даних для подальшого використання моделей AI [12-14], особливо аналіз властивостей метеоданих [15-20], створює умови для подальшого визначення складних структурних та семантичних залежностей метеоданих за допомогою GNNs [3,4].

Важливість підготовки даних з метою подальшого використання оброблених даних за допомогою моделей AI, складно перебільшити, тому що не підготовлені належним чином дані можуть унеможливити переваги використання моделей AI для прогнозування метеоумов взагалі.

Виділення невирішених проблем в дослідженнях

Незважаючи на значний прогрес у метеопрогнозуванні, існують невирішені питання, пов'язані зі збором, обробкою та використанням метеоданих для навчання моделей AI. Визначені проблеми впливають на точність прогнозів та їх адаптацію до локальних умов. Основні невирішені питання включають наступні аспекти:

- 1) Питання забезпечення якості та повноти даних залишається актуальним завданням, тому що існує значна залежність точності моделей AI від якості вхідних даних, які використовуються для навчання моделей AI.
- 2) Проблемою залишається інтеграція метеоданих, що отримані із різних джерел метеоданих, таких як, супутникові знімки, дані із наземних метеостанцій та метеорадіолокаційних систем, дані з повітряних суден і т.д., у єдину систему, яка б дозволяла моделям AI враховувати різноманітність джерел та знижувати похибку прогнозування.
- 3) Недостатня адаптивність моделей до локальних умов виникає як результат недостатнього врахування специфічних локальних умов. Погодні явища, такі як місцеві грози, тумани або сильні вітри, можуть не враховуватись у глобальних моделях, що призводить до суттєвих похибок у прогнозах. Необхідні подальші дослідження щодо адаптації моделей до мікрометеоумов для забезпечення більш точної і своєчасної інформації для окремих населених пунктів або регіонів.
- 4) Необхідно продовжувати дослідження з покращення моделювання екстремальних

метеоподій, щоб зменшити ризики та підвищити надійність прогнозів, незважаючи на складність моделювання крайніх погодних явищ, таких як шторми, урагани, сильні опади та інші екстремальні явища.

- 5) Зниження витрат на обчислювальні ресурси та підвищення ефективності використання великих даних є актуальною задачею для підвищення продуктивності сучасних систем прогнозування метеоумов.

Мета та задачі дослідження

Метою даної роботи є формування підходу та створення системи підготовки метеоданих для подальшого навчання GNN з метою покращення прогнозування метеоумов.

Задачі дослідження включають:

- 1) Вивчення ресурсів і методів збору метеоданих, що передбачає розгляд різноманітних джерел історичних метеоданих, зокрема різноманітних метеоресурсів та міжнародних метеорологічних баз даних. Частина ресурсів є відкритою для використання за допомогою API сайтів відповідних ресурсів. Треба оцінити якість, точність і доступність даних ресурсів для подальшої обробки і використання.
- 2) Аналіз методів обробки і зберігання метеоданих, що передбачає визначення ефективних методів обробки великих обсягів метеоданих, включаючи очищення даних, інтеграцію даних із різних джерел і зберігання у базі даних. Треба обрати та створити базу даних, що відповідає вимогам навчання GNNs.

Визначені задачі досліджень спрямовані на створення комплексного підходу до збору та обробки даних, що забезпечить основу для ефективного навчання GNNs та підвищення точності прогнозів метеоумов.

Основна частина

Метою дослідження в роботі є визначення етапів підготовки метеоданих для навчання GNN моделі прогнозування метеоумов (рис.1). Створена програма, яка виконує збір та аналіз метеоданих з різних метеорологічних API ресурсів, а також зберігає дані в базі даних для забезпечення прогнозу метеоумов для певної геолокації.

Обробка метеоданих включає декілька етапів і на кожному етапі можливе використання методів AI:

- 1) Очищення даних, яка забезпечує усунення пропусків, шумів та аномалій, які можуть спотворити результати.

- 2) Нормалізація даних, яка перетворює різні за форматами дані, наприклад, різними за одиницями виміру та масштабами, до єдиного формату, що полегшує навчання нейронних мереж.
- 3) Агрегація даних на різних рівнях, наприклад, збір даних про температуру, вологість або про інші параметри на щоденній або погодинній основі, а не на коротших інтервалах, дозволяє зменшити розмір набору даних і зосередитися на ключових трендах.
- 4) Аналіз додаткових властивостей даних, що вміщує процеси створення нових атрибутів, перетворення атрибутів, вилучення атрибутів, вибір атрибутів та масштабування атрибутів;



Рисунок 1. Підготовка метеоданих для навчання ML моделей

Створення передумов для зберігання та поповнення метеоданих в сучасних базах даних в реальному часі формує практичну безперервність обробки метеоданих, що забезпечує відповідну якість прогнозу метеоумов.

Для реалізації системи підготовки даних в роботі створена програма на мові програмування Python, що використовує бібліотеку Requests для роботи з API метеоресурсами шляхом обробки HTTP-запитів та бібліотеку Pandas для статистичного аналізу даних. Програма опитує кожен з обраних API і отримує такі основні метеопказники, як температура, вологість, тиск та швидкість вітру. Метеодані інтегруються з кожного API в єдину структуру та виконується їх подальша

обробка та збереження в базі даних MongoDB Atlas.

Метеодані з API метеоресурсів є напівструктурованими, оскільки містять як структуровані елементи, наприклад, значення координат, часу, масиви числових значень, так і менш структуровані елементи, наприклад, текстову інформацію щодо метеоумов. Для зберігання таких даних необхідне рішення, що підтримує гнучкість структури даних та ефективно працює з великими обсягами інформації. Тому було обрано MongoDB Atlas, який дозволяє зберігати дані у вигляді JSON-об'єктів.

Кожен документ у MongoDB представляє собою окремий набір метеоданих для певної геолокації та часу. Основні поля документа включають географічну інформацію (координати), час отримання даних та метеопараметри (температура, вологість, тиск, швидкість вітру тощо). Для багатовимірних значень, що описують погодні умови, MongoDB Atlas дозволяє зберігати масиви числових значень, що спрощує роботу з ними та подальший аналіз. Крім того, можливе зберігання даних у якості таких об'єктів, як зображення, аудіо, відео, файли документів та інших форматів файлів.

Привілеї MongoDB Atlas:

- 1) Гнучка структура зберігання: MongoDB дозволяє зберігати дані в документно-орієнтованому форматі, що спрощує інтеграцію даних з різних API з різними структурами. Це дозволяє зберігати метеорологічні параметри як JSON-документи з можливістю динамічного додавання нових полів.
- 2) Масштабованість: MongoDB Atlas надає можливість горизонтального масштабування, що забезпечує обробку великої кількості даних без втрати продуктивності. Це важливо для системи, яка постійно збільшує обсяг даних за рахунок підключення нових джерел.
- 3) Швидкий доступ до даних: MongoDB Atlas оптимізована для швидкого пошуку і фільтрації даних, що дозволяє оперативно отримувати метеопказники для аналізу та прогнозування.
- 4) Реплікація та резервування: хмарна інфраструктура MongoDB Atlas забезпечує надійне зберігання даних завдяки реплікації і автоматичному резервуванню, що дозволяє мінімізувати ризики втрати даних.
- 5) Підтримка векторних даних: MongoDB Atlas має можливість працювати з векторними даними, що дозволяє зберігати та ефективно обробляти багатовимірні показники метеорологічних

умов. Це важливо для складного аналізу прогнозів погоди.

Запропонована в роботі система підготовки метеоданих складається з декількох компонентів:

- 1) Компонент збирання даних через API кожного із ресурсів забезпечує отримання набору метеопказників для конкретної геолокації. Кожен API повертає різні набори даних, тому важливо привести їх до спільного формату. Відповідні API ресурси можуть надавати інформацію про температуру, вологість, тиск, швидкість та напрямок вітру, атмосферні явища та інші метеопараметри.
- 2) Компонент інтеграції даних виконує стандартизацію отриманих даних з API ресурсів шляхом перетворення до спільного формату за допомогою існуючих бібліотек Python. Всі показники нормалізуються за типами та одиницями вимірювання. Під час інтеграції виконується перевірка даних на повноту та коректність: відсутні або некоректні значення обробляються або фільтруються. Це дозволяє об'єднувати дані з різних джерел у єдиний набір для подальшого аналізу та обробки.
- 3) Компонент обробки зібраних даних агрегує та обчислює акумульовані показники для кожного метеопараметра. На цьому етапі застосовуються алгоритми для згладжування коливань і виявлення трендів. Мета обробки – підвищити точність прогнозів, зменшити вплив відхилень і об'єднати дані з різних джерел для подальшого аналізу.
- 4) Компонент зберігання даних розміщує та оновлює дані у створеній базі даних MongoDB Atlas, яка є гнучкою NoSQL базою даних. Кожен запис в базі MongoDB Atlas містить інформацію про метеопказники у форматі документа, що дозволяє зберігати структуровані, напівструктуровані та неструктуровані дані та формувати вектори даних.

В роботі розглянуто на прикладі запропонований підхід, який дозволяє визначити серед виділених безкоштовних API ресурсів метеоумов, такий ресурс, що демонструє якісне визначення тенденцій в метеоданих, а результати прогнозування за таким ресурсом можуть бути інтегровані з даними локальної метеостанції для подальшого навчання GNN. Було виконано аналіз доступності даних, діапазону значень метеопказників, терміну прогнозування та інших характеристик.

Основними метеопказниками, на основі яких проводились визначення API ресурса з найбільш репрезентативними даними, обрано значення температури, вологості, тиску та швидкості вітру. Визначені показники названо основними, тому що такий набір показників зустрічається в більшості розглянутих API метеоресурсів.

Агрегація метеоданих в API ресурсах визначена в групах: поточні (далі C-base), погодинні (далі H-base) та поденні показники (далі D-base).

C-base показники: Температура, Вологість, Тиск, Швидкість вітру.

H-base показники: Температура, Вологість, Тиск, Швидкість вітру.

D-base показники: Максимальна температура, Мінімальна температура, Середня вологість, Максимальна швидкість вітру, УФ-індекс.

Опис обраних API метеоресурсів наведено у табл.1. Доступність API метеоданих (табл.1), є безкоштовною з обмеженнями, але для API ресурсів, які помічені *, доступність обмежена 30 добами. Прогнозування метеопказників на один і той самий час доби по кожному з API ресурсів для визначеної геолокації є ключовим аспектом точності даних. Це дозволяє порівнювати різні джерела в реальному часі та виявляти можливі розбіжності між метеоданими.

Таблиця 1

Опис API метеоресурсів		
Назва API ресурса	Метеопказники, що надаються API ресурсом метеоданих	Доступний план використання API ресурса
WeatherAPI (https://www.weather-api.com/)	Поточні: C-base, УФ-індекс, температура вітру, опади, хмарність, відчувається як, видимість	Після реєстрації надається Pro Plus план на 14 днів, який надає наступні привілеї: 5 мільйонів запитів на місяць, прогноз погоди на 14 днів вперед, історичний прогноз погоди за останні 365 днів. Після спливу 14 днів надається Free план, який надає наступні привілеї: 1 мільйон запитів на місяць, прогноз погоди на 3 дні вперед, історичний прогноз погоди за останні 7 днів.
	Погодинні: H-base, УФ-індекс, температура вітру, опади, шар снігу, хмарність, відчувається як, індекс тепла, шанс дощу, шанс снігу, видимість	
	Поденні: D-base, УФ-індекс, середня температура, загальна сума опадів, середня видимість, шанс дощу, шанс снігу, загальний шар снігу	
Weatherbit (https://www.weather-bit.io/)	Поточні: C-base, УФ-індекс, індекс якості повітря, хмарність, точка роси, кількість опадів, кількість снігу, видимість	Після реєстрації надається Business Trial план на 21 днів, який надає наступні привілеї: 1500 запитів на день, поденний прогноз погоди на 16 днів вперед, погодинний прогноз на 240 годин вперед, історичний прогноз погоди за останні 20 років. Після спливу 21 дня надається Free план, який надає наступні привілеї: 50 запитів на день, прогноз погоди на 7 днів вперед, історичний прогноз погоди відсутній.
	Погодинні: H-base, УФ-індекс, хмарність, точка роси, вміст озону, опади, кількість снігу, видимість	
	Поденні: D-base, УФ-індекс, хмарність, точка роси, вміст озону, опади, тиск, кількість снігу, видимість	
Tomorrow.io (https://app.tomorrow.io/)	Поточні: C-base, УФ-індекс, хмарність, точка роси, опади, видимість, інтенсивність снігу	Після реєстрації надається Free план, який надає наступні привілеї: 500 запитів на день, 25 запитів на годину, 3 запити на секунду, прогноз погоди на 5 днів вперед, історичний прогноз за минулу добу.
	Погодинні: H-base, УФ-індекс, хмарність, точка роси, опади, кількість снігу, видимість	
	Поденні: D-base, УФ-індекс, хмарність, точка роси, опади, тиск, кількість снігу, видимість, напрямок вітру	
Visual Crossing (https://www.visualcrossing.com/)	Поточні: C-base, точка роси, кількість опадів, кількість снігу, видимість, хмарність, сонячна радіація, УФ-індекс, погодні	Після реєстрації надається Free план, який надає наступні привілеї: 1000 запитів на день, прогноз погоди на 15 днів вперед,

	умови	історичний прогноз за останні 50 років.
	Погодинні: H-base, точка роси, кількість опадів, кількість снігу, тиск, видимість, хмарність, сонячна радіація, УФ-індекс, погодні умови	
	Поденні: D-base, УФ-індекс, середня температура, точка роси, кількість опадів, кількість снігу, тиск, хмарність, видимість, сонячна радіація	
Open-Meteo (https://open-meteo.com/)	Поточні: C-base, кількість опадів, кількість снігу, хмарність	Після реєстрації надається Free план, який надає наступні привілеї: 10000 запитів на день, прогноз погоди на 16 днів вперед, історичний прогноз з 1940 року.
	Погодинні: H-base, точка роси, кількість опадів, кількість снігу, хмарність, видимість	
	Поденні: D-base, УФ-індекс, кількість опадів, кількість снігу	
Xweather * (https://www.xweather.com/)	Поточні: C-base, точка роси, кількість опадів, кількість снігу, хмарність, видимість, УФ-індекс, погодні умови	Після реєстрації надається Free Trial план, який надає наступні привілеї: 1000 запитів на день, прогноз погоди на 7 днів вперед, історичний прогноз відсутній.
	Погодинні: H-base, точка роси, кількість опадів, кількість снігу, хмарність, видимість, УФ-індекс, погодні умови	
	Поденні: D-base, УФ-індекс, середня точка роси, кількість опадів, кількість снігу, погодні умови	
OpenWeatherMap (https://openweathermap.org/)	Поточні: C-base, хмарність, видимість	Після реєстрації надається Free план, який надає наступні привілеї: 1000000 запитів на місяць, 60 запитів на хвилину, прогноз погоди на 5 днів вперед з трьох годинними інтервалами, історичний прогноз за останні 40 років (платно).
	Погодинні: H-base, кількість опадів, хмарність, погодні умови	
	Поденні: D-base, кількість опадів, хмарність, погодні умови	
Foreca * (https://developer.foreca.com/)	Поточні: C-base, хмарність, видимість, точка роси, кількість опадів, УФ-індекс	Після реєстрації надається Free план, який надає наступні привілеї: 2000 запитів на день, прогноз погоди на 1 день вперед з годинними інтервалами, історичний прогноз відсутній.
	Погодинні: H-base, кількість опадів, хмарність, погодні умови	
	Поденні: D-base, кількість опадів	
Meteosource * (https://www.meteosource.com/)	Поточні: Температура, тиск, швидкість вітру, хмарність, кількість опадів, погодні умови	Після реєстрації надається Free план, який надає наступні привілеї: 400 запитів на день, прогноз погоди на 7 днів вперед, погодинні прогнози на 1 день вперед, історичний прогноз відсутній.
	Погодинні: Температура, швидкість вітру, хмарність, кількість опадів, погодні умови	

	Поденні: Максимальна температура, мінімальна температура, максимальна швидкість вітру, хмарність, кількість опадів, погодні умови	
Meteoblue (https://www.meteoblue.com/)	Поточні: Температура, швидкість вітру	Після реєстрації надається Free план, який надає наступні привілеї: прогноз погоди на 7 днів вперед з годинними інтервалами, історичний прогноз за останні 4 дні.
	Погодинні: Температура, вологість, швидкість вітру, хмарність, кількість опадів, тиск, УФ-індекс	
	Поденні: Максимальна температура, мінімальна температура, максимальна швидкість вітру, максимальна вологість, мінімальна вологість, тиск, УФ-індекс	

Метеопказники на одну й ту ж саму годину по кожному API ресурсу на певну геолокацію (місто Харків, Україна) наведені в табл.2.

Таблиця 2

Метеорологічні показники з API ресурсів

Назва API	Температура (°C)	Вологість (%)	Тиск (hPa)	Швидкість вітру (км/год)
WeatherAPI	-0.6	82	1034	1.4
Weatherbit	-0.5	84	1017	1.83
Tomorrow.io	-1.06	92.74	1015.34	0.61
Visual Crossing	-0.7	94.31	1034	2.2
Open-Meteo	-1.1	90	1033.5	1.5
XWeather	-1.2	87	1034	1
OpenWeatherMap	-0.22	78	1034	0.54
Foreca	0	-	-	1
Meteosource	-1	-	-	0.4
Meteoblue	-0.11	81	1033.9	0.32

Якщо порівняти один із ключових метеопказників, наприклад, температуру для відповідної геолокації, зафіксовану в той самий час, коли були зроблені прогнозовані значення, що розміщені в API ресурсах, можна зробити такі висновки: локальна фактична температура становила -0.5°C (1 грудня 2024 року о 23:00), і наближені прогнозовані дані до цього показника надали сервіси: WeatherAPI – -0.6°C та Visual Crossing – -0.7°C. Найбільш наближеним виявився API ресурс Weatherbit, прогноз якого повністю співпав із фактичною температурою, склавши -0.5°C. Наведені результати аналізу є спрощеними. Використання різних метрик якості результатів

прогнозу можливо при наявності повноти бази даних для системи прогнозування.

Підготовка метеоданих для навчання графової нейронної мережі дозволила виявити певні тенденції в метеоданих, використовуючи статистичний аналіз. Враховані аномалії та варіації для покращення моделі прогнозування. В роботі використана Python бібліотека pandas [21].

В табл.3, для прикладу, описано визначення статистичних показників атрибуту «температура» методом describe бібліотеки pandas.

Таблиця 3

Статистичні характеристики атрибуту «температура»

Параметр	Опис параметру	Формула	Опис формули
mean	Середнє арифметичне значення	$\bar{x} = \frac{\sum x}{n}$	$\bar{x}$ – середнє арифметичне, x – значення температури для певного API ресурсу, n – кількість API ресурсів.

std	Стандартне відхилення	$s = \sqrt{\frac{\sum (x - \bar{x})^2}{n - 1}}$	s – стандартне відхилення, x – значення температури для певного API ресурсу, $\bar{x}$ – середнє арифметичне, n – кількість API ресурсів.
min	Мінімальне значення	$x_{min} = \min(x_1, x_2, \dots, x_n)$	x_{min} – найменше значення температури серед API даних, $x_1, x_2, \dots, x_n$ – показники температури.
max	Максимальне значення	$x_{max} = \max(x_1, x_2, \dots, x_n)$	x_{max} – найбільше значення температури серед API даних, $x_1, x_2, \dots, x_n$ – показники температури.
25%	Перший квартиль	$Q_1 = x[0.25n]$	Q_1 – значення, нижче якого знаходиться 25% температур, визначене як медіана нижньої половини даних, x – значення температури для певного API ресурсу, n – кількість API ресурсів.
50%	Другий квартиль (медіана)	$Q_2 = x[0.5n]$	Q_2 – значення, що ділить впорядкований набір температур на дві рівні частини (50% нижче, 50% вище), x – значення температури для певного API ресурсу, n – кількість API ресурсів.
75%	Третій квартиль	$Q_3 = x[0.75n]$	Q_3 – значення, нижче якого знаходиться 75% температур, визначене як медіана верхньої половини даних, x – значення температури для певного API ресурсу, n – кількість API ресурсів.

На рис.2 наведено фрагмент Python програми визначення статистичних властивостей метеоданих, на прикладі атрибута «температура».

```

1 import pandas as pd
2
3 data = {
4     "API": [
5         "WeatherAPI", "Weatherbit", "Tomorrow.io", "Visual Crossing",
6         "Open-Meteo", "XWeather", "OpenWeatherMap", "Foreca", "Meteosource",
7         "Meteoblue"
8     ],
9     "Temperature (°C)":
10    [-0.6, -0.5, -1.06, -0.7, -1.1, -1.2, -0.22, 0, -1, -0.11]
11 }
12 df = pd.DataFrame(data)
13 description = df["Temperature (°C)"].describe()
14 print(description)

```

Рисунок 2. Визначення статистичних властивостей метеоданих

Отримані статистичні характеристики (табл.4) використані для аналізу даних. Наприклад,

мінімальне та максимальне значення дозволяють ідентифікувати крайні випадки (аномалії), стандартне відхилення показує рівень варіативності в даних, а квартилі дозволяють визначити розподіл значень.

Аналіз метеоданих допомагає виявити тенденції та зробити висновки щодо стабільності роботи API ресурсів, що особливо важливо для навчання графової нейронної мережі в реальному часі.

Таблиця 4

Отримані значення статистичних характеристик атрибуту «температура» із 10 API ресурсів

Параметр	Значення
mean	-0.649
std	0.437
min	-1.2
max	0
25%	-1.04
50%	-0.65
75%	-0.29

Висновки

У роботі було розглянуто підхід до збору метеоданих з використанням 10 безкоштовних API метеоресурсів, а також обробки та зберігання метеоданих. Проаналізовано інтеграцію даних з різних джерел та перетворення метеоданих для подальшого аналізу. Особлива увага була приділена нормалізації та перевірці даних для забезпечення точності та повноти. Виконано статистичний аналіз метеоданих.

Створена програма на мові Python, яка забезпечує автоматичну підготовку метеоданих для наступних етапів аналізу та використання.

В роботі обгрунтовано вибір MongoDB Atlas для зберігання метеоданих. MongoDB Atlas дозволяє гнучко працювати з багатовимірними метеопоказниками та ефективно масштабуватися відповідно до обсягів даних. Завдяки можливості зберігання даних у документно-орієнтованому форматі, MongoDB Atlas забезпечує швидкий доступ до необхідних показників для аналізу та прогнозування.

Запропонований в роботі підхід є комплексним відносно інтеграції та обробки метеоданих, що дозволить отримувати більш впевнені результати прогнозів. Майбутній розвиток системи підготовки метеоданих для моделей AI, що використовуються для прогнозування метеоумов, передбачає впровадження нових методів обробки даних, які сприятимуть глибшому виявленню патернів у метеоданих і підвищенню точності прогнозів.

СПИСОК ПОСИЛАНЬ

- 1) Brotzge J. et al. Challenges and Opportunities in Numerical Weather Prediction. URL: <https://journals.ametsoc.org/view/journals/ba>

- ms/104/3/BAMS-D-22-0172.1.xml (Last accessed: 20.09.2024)
- 2) Bochenek B., Ustrnul Z. Machine Learning in Weather Prediction and Climate Analyses - Applications and Perspectives. URL: <https://www.mdpi.com/2073-4433/13/2/180> (Last accessed: 22.09.2024)
- 3) Keisler R. Forecasting Global Weather with Graph Neural Networks. URL: <https://arxiv.org/abs/2202.07575> (Last accessed: 21.09.2024)
- 4) Yang O. et al. Multi-modal graph neural networks for localized off-grid weather forecasting. URL: <https://arxiv.org/abs/2410.12938> (Last accessed: 1.11.24)
- 5) Structured vs unstructured data. URL: <https://www.ibm.com/think/topics/structured-vs-unstructured-data#:~:text=Storage%3A%20Structured%20data%20is%20stored,databases%2C%20which%20require%20more%20space> (Last accessed: 22.11.2024)
- 6) Structured vs Unstructured Data: An Overview. URL: <https://www.mongodb.com/resources/basics/unstructured-data/structured-vs-unstructured> (Last accessed: 22.11.2024)
- 7) Unstructured Data. URL: <https://www.mongodb.com/resources/basics/unstructured-data> (Last accessed: 22.11.2024)
- 8) Parsons N. MongoDB Atlas - Technical Overview & Benefits. URL: <https://medium.com/@nparsons08/mongodb-atlas-technical-overview-benefits-9e4cff27a75e> (Last accessed: 22.09.2024)
- 9) European Centre for Medium-Range Weather Forecasts. URL: <https://www.ecmwf.int/en/about> (Last accessed: 21.09.2024)
- 10) National Oceanic and Atmospheric Administration. URL: <https://www.noaa.gov/about-our-agency> (Last accessed: 21.09.2024)
- 11) Introduction. WeatherAPI. URL: <https://www.weatherapi.com/docs/> (Last accessed: 22.09.2024)
- 12) Lawton G. What is data preprocessing? URL: <https://www.techtarget.com/searchdatamanagement/definition/data-preprocessing#:~:text=What%20is%20data%20preprocessing%3F,for%20the%20data%20mining%20process> (Last accessed: 1.11.24)
- 13) A Comprehensive Guide to Data Preprocessing. URL: <https://neptune.ai/blog/data-preprocessing-guide> (Last accessed: 1.11.24)

- 14) Feature Engineering. URL: <https://www.heavy.ai/technical-glossary/feature-engineering>. (Last accessed: 1.11.24)
- 15) Checa-Garcia R. Statistics for Weather and Climate: Introduction. URL: https://www.researchgate.net/publication/312490308_Statistics_for_Weather_and_Climate_Introduction (Last accessed: 1.11.24)
- 16) Jayakumar R., Saravanan R. Weather data analysis data preprocessing. URL: <https://www.pnrjournal.com/index.php/home/article/download/4548/5018/5589> (Last accessed: 1.11.24)
- 17) Juneja A., Das N. Big Data Quality Framework: Pre-Processing Data in Weather Monitoring Application. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8862267> (Last accessed: 1.11.24)
- 18) Labeeb K. et al. Pre-Processing Data In Weather Monitoring Application By Using Big Data Quality Framework. URL: <https://doi.org/10.1109/WIECON-ECE52138.2020.9397990>
- 19) Thosar S., Bhoyar B., Patil T. Pre-Processing of Data to achieve Quality in Weather Monitoring App. URL: <https://www.irjet.net/archives/V7/i5/IRJET-V7I51394.pdf> (Last accessed: 1.11.24)
- 20) Paranjape A., Katta P., Ohlenforst M. Automated Data Preprocessing for Machine Learning Based Analyses. COLLA 2022: The Twelfth Intern. Conf. on Advanced Collaborative Networks, Systems and Applications. IARIA, 2022. URL: https://www.researchgate.net/publication/361026018_Automated_Data_Preprocessing_for_Machine_Learning_Based_Analyses (Last accessed: 1.11.24)
- 21) pandas.DataFrame.describe. URL: <https://pandas.pydata.org/docs/reference/api/pandas.DataFrame.describe.html> (Last accessed: 1.11.24)

Petrenko T., Zadorozhnyi A. Preprocessing of Meteorological Data for Training an Artificial Intelligence Model

Forecasting weather conditions by classical methods is now successfully supplemented by artificial intelligence methods that allow processing unstructured, semi-structured and structured data. The article considers and analyzes such sources of semi-structured weather data as open APIs of weather resources. An approach to preparing weather data as data for training a graph neural network for forecasting weather data is proposed. The ability to obtain JSON objects with weather parameters

(temperature, humidity, pressure, wind speed) by processing HTTP requests using the created Python program and the Requests library ensured the execution of the first stage of data preprocessing. The properties of the selected weather resources and the approach to preparing data for use are described. After receiving weather data from 10 different weather resource APIs, the data are combined and structured. Cleaning, normalization, aggregation and analysis of additional properties of the collected weather data are performed. For example, the calculation of statistical characteristics of the weather indicator "temperature" using Python tools is given.

The article justifies the use of the MongoDB Atlas database to store unstructured meteorological data as objects such as images, audio, video, document files, and other file formats. MongoDB Atlas supports a document-oriented format that increases the flexibility and scalability of data management, which is an advantage for processing large and complex meteorological datasets used in training a graph neural network. The proposed approach combines preprocessing and data storage into a single structure, ensuring the completeness and representativeness of meteorological data. This integration increases the reliability of weather forecasts by using a variety of data. Research confirms the advantages of using MongoDB Atlas and a graph neural network together in capturing spatial and temporal relationships in meteorological data.

Keywords: weather API, weather data preprocessing, statistical analysis, Python libraries, MongoDB Atlas

Петренко Тетяна Григорівна, кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри інформаційних технологій, Український державний університет залізничного транспорту, Харків, Україна. E-mail: petrenko_tg@kart.edu.ua, ORCID ID <http://orcid.org/0000-0001-6305-7918>.

Задорожний Антон Юрійович, аспірант кафедри інформаційних технологій, Український державний університет залізничного транспорту, Харків, Україна. E-mail: zadorojniy85@kart.edu.ua, ORCID ID: <https://orcid.org/0009-0000-5044-6068>

Tetyana Petrenko, PhD, associate professor, department of information technology, Ukrainian State University of Railway Transport, Kharkiv, Ukraine. E-mail: petrenko_tg@kart.edu.ua, ORCID ID <http://orcid.org/0000-0001-6305-7918>

Anton Zadorozhnyi, post-graduate student, department of information technology, Ukrainian State University of Railway Transport, Kharkiv, Ukraine. E-mail: zadorojniy85@kart.edu.ua, ORCID ID: <https://orcid.org/0009-0000-5044-6068>

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

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

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

Порівняльна характеристика та проблеми побудови координатних систем регулювання рухом поїздів

Дана коротка характеристика основних варіантів побудови та структури координатних систем регулювання рухом поїздів. Встановлено, що найбільшу пропускну спроможність можуть забезпечити системи з рухомими блок-ділянками. В таких системах блок-ділянки існують лише в математичних моделях, що дає змогу створювати межі та довжину блок-ділянок з розрахунку координати хвоста попереду розташованого поїзда та довжини мінімально допустимого захисного інтервалу з урахуванням реальних характеристик обох поїздів.

Визначено список функцій, що виконуються в системах координатного регулювання руху поїздів з рухомими блок-ділянками. Серед них важливе місце займають операції, пов'язані з отриманням та обробкою координатної інформації – визначення координати голови та довжини поїзда, розрахунок допустимої швидкості руху поїзда до хвоста попереду розташованого поїзда.

Основні проблеми полягають у створенні програмного забезпечення для розрахунку віртуальних блок-ділянок як підрозділів в рамках існуючої архітектури, а також забезпечення високої надійності каналів радіозв'язку. Наведені основні компоненти програмного забезпечення, необхідні для розрахунку віртуальних блок-ділянок. Воно повинно розраховувати координати стану (місцезнаходження, швидкість) на підставі інформації від датчиків. За результатами оцінки координат стану необхідно проводити їх екстраполяцію з урахуванням динамічних властивостей (тягових та гальмівних можливостей) поїздів. Координатна інформація також є базою для формування команд керування рухом поїздів та вирішення задач оптимізації параметрів руху поїздів (точність виконання графіку руху поїздів, мінімізація енергозатрат та ін.).

Проведено аналіз практичної реалізації координатних методів регулювання рухом поїздів в системах, що експлуатуються у світі. За результатами аналізу встановлено, що на сьогоднішній день лише в європейській системі ETSC-3 мінімальний міжпоїзний інтервал визначається на основі розрахунку довжини гальмівного шляху та координати хвоста попереду розташованого поїзда, що значно підвищує пропускну здатність ділянки. У зв'язку з обмеженнями пропускну спроможності та у зв'язку з великими очікуваннями економії на інфраструктурі попит на ETCS-3 зростає. Це також дозволяє видалити колійне обладнання для виявлення поїздів, такі як рейкові кола або лічильники осей. Однак вона знаходиться в стадії розробки, тому що є велика кількість проблем на шляху реалізації.

Ключові слова: координатні системи регулювання, інтервальне регулювання, рухомі блок-ділянки, автоматичне регулювання руху поїздів, канал радіозв'язку.

Вступ

Для збільшення пропускну спроможності залізничних колій у 70-х роках XX в. були запропоновані принципи координатної організації руху поїздів.

© ХІСМАТУЛІН В.Ш., САГАЙДАЧНИЙ В.Г., ПЕЛЕХ В.Р. 2024

Координатні системи організації рухом поїздів, на відміну від традиційних систем інтервального регулювання, надають можливість регулювання інтервалу часу між поїздами відповідно до їх фактичної швидкості та відносними швидкостями між ними.

Мета

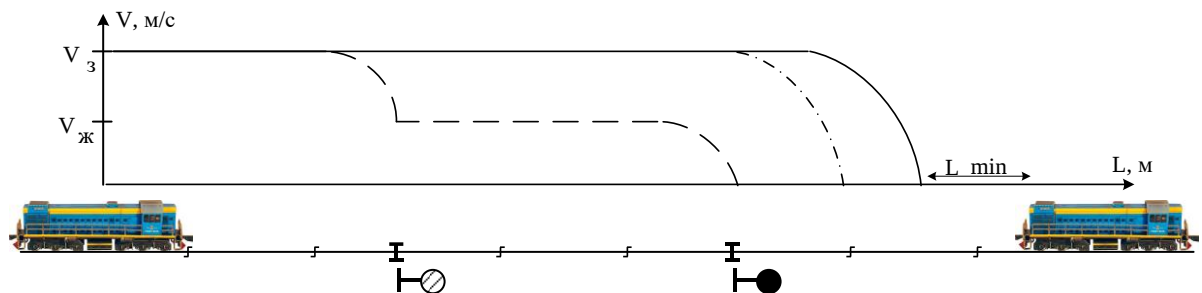
Метою роботи є визначення списку функцій, що виконуються в системах координатного регулювання руху поїздів, аналіз стану та проблем щодо їх практичної реалізації в різних системах, що експлуатуються у світі.

Основний матеріал

Координатні системи розподіляються на два основні типи – з фіксованими та з рухомими блок-ділянками [1]. В системах з фіксованими блок-ділянками їх довжина визначається фактичною швидкістю руху поїзда та його гальмівними можливостями на ділянці між

попереджувальним сигналом та сигналом огороження. В системах з рухомими блок-ділянками блок-ділянки існують лише в математичних моделях, що дає змогу створювати межі та довжину блок-ділянок з розрахунку координати хвоста попереду розташованого поїзда та довжини мінімально допустимого захисного інтервалу з урахуванням реальних характеристик обох поїздів.

Для порівняння можливостей координатних методів на рисунку 1 приведено криві гальмування для різних способів організації руху поїздів на перегоні.



----- інтервальні системи керування; - - - - координатні системи керування з фіксованими блок-ділянками, ————— координатні системи керування з рухомими блок-ділянками

Рисунок 1 – Програмні криві гальмування інтервальних та координатних способів керування рухом поїздів

Загальна структурна схема організації руху поїздів при координатному регулюванні представлена на рисунку 2. Згідно із схемою, керування рухом поїздів виконується шляхом обробки координатної інформації з поїздів, що знаходяться на перегоні, та формування команд керування рухом.

Команди керування розраховуються на підставі даних про тип поїздів, параметри їх руху (місцезнаходження, фактичні швидкості) та гальмівні можливості. При розрахунку команд керування визначається мінімально допустимий інтервал до хвоста попереднього поїзда, а відповідно до нього формуються обмеження та рекомендовані параметри руху.

Координатний принцип регулювання руху поїздів не потребує використання традиційних рейкових кіл для визначення місцезнаходження поїзда та обміну інформації між ними. Замість

цього організовується неперервний двосторонній цифровий радіозв'язок.

На основі матеріалів [1, 2, 3] визначено список функцій, що виконуються в системах координатного регулювання руху поїздів:

- 1) обмін даними між колійними та локомотивними пристроями за допомогою радіоканалу;
- 2) обмін даними між сусідніми локомотивами;
- 3) визначення координати голови поїзда;
- 4) визначення довжини поїзда;
- 5) розрахунок допустимої швидкості руху поїзда до хвоста попереду розташованого поїзда;
- 6) можливість погодження з традиційними системами автоматичного блокування;
- 7) контроль цілісності поїзда;
- 8) самодіагностика системи.

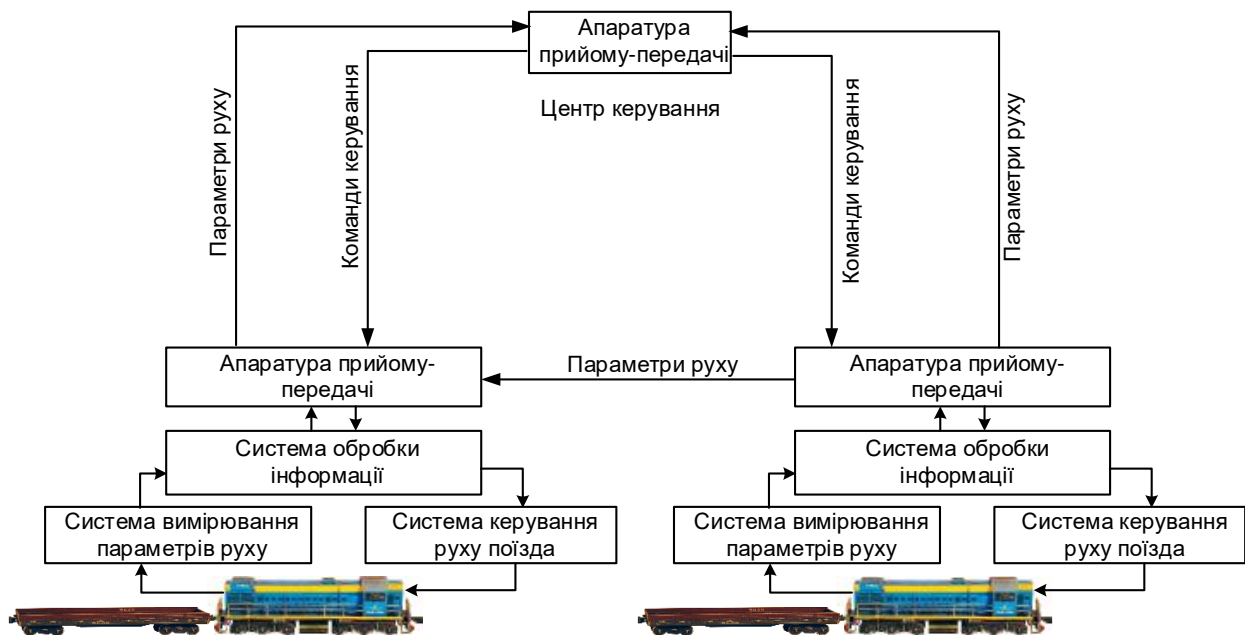


Рисунок 2 – Структурна схема системи координатного регулювання руху поїздів

На сьогоднішній день у світі експлуатуються декілька систем координатного регулювання руху поїздів. Серед них найбільше розповсюдження знайшли системи ITCS виробництва компанії General Electric [1], європейська система ETCS першого та другого та рівнів [4,5], система СИРДП-Е виробництва

компанії Bombardier [6], а також АЛСР, що розроблена НІПЦ «Промелектроніка» [7], АБТЦ-МШ та КЛУБ-У [8,9], які були розроблені ОАО «ВНИИАС».

Аналіз відповідності існуючих систем представленому списку функцій наведено у таблиці 1.

Таблиця 1 – Оцінка функцій існуючих координатних систем регулювання руху поїздів

№ функції	ITCS	АЛСР	СИРДП-Е	ETCS 2	АБТЦ-МШ	КЛУБ-У
1	+	+	+	+	+	+
2	–	–	–	+	–	–
3	+	+	+	+	+	+
4	–	–	–	+	–	–
5	–	–	–	–	–	–
6	–	+	+	+	+	+
7	+	–	–	+	–	–
8	+	+	+	+	+	+

Таким чином, жодна з розглянутих систем не забезпечує виконання функції розрахунку допустимої швидкості руху поїзда до хвоста попереду розташованого поїзда, тобто вони є системами з фіксованими блок-ділянками, що за основними принципами функціонування мало відрізняються від традиційних інтервальних систем регулювання рухом поїздів.

Зараз в стадії розробки знаходиться лише одна координатна система регулювання руху поїздів з рухомими блок-ділянками – система ETCS-3 третього рівня [5,10]. В ній мінімальний міжпоїзний інтервал визначається на основі розрахунку довжини гальмівного шляху та координати хвоста попереду розташованого поїзда, що значно підвищує пропускну здатність

ділянки. Технологія ETCS-3 постійно контролює безпечну максимальну швидкість кожного поїзда, кабіна сигналізує машиністу, а бортові системи беруть на себе управління у разі перевищення допустимої швидкості. В системі ETCS-3 регулювання руху поїздів виконується лише за допомогою цифрового радіоканалу з диспетчерського центру керування.

Структура системи ETCS-3 наведена на рисунку 3.

Диспетчерський центр керування складається з двох серверів радіоблокування, що взаємодіють з:

- сервером системи GSM-R для передачі даних на локомотив;
- сервером бази даних;
- сервером даних інфраструктури;

– автоматизованим робочим місцем диспетчера;
 – діючою системою автоматичного блокування;
 – автоматизованим робочим місцем адміністратора.

Локомотивне обладнання складається з бортового комп'ютера EVC, що приймає дані від антен. Після обробки отримана інформація

передається на дисплей машиніста. Локомотивні пристрої системи ETCS доповнюються датчиком шляху, швидкості та тиску у гальмівних магістрях.

Локомотивні пристрої визначають своє місцезнаходження за допомогою датчика шляху, що корегується за допомогою пристроїв приймання-передачі Eurobalise.

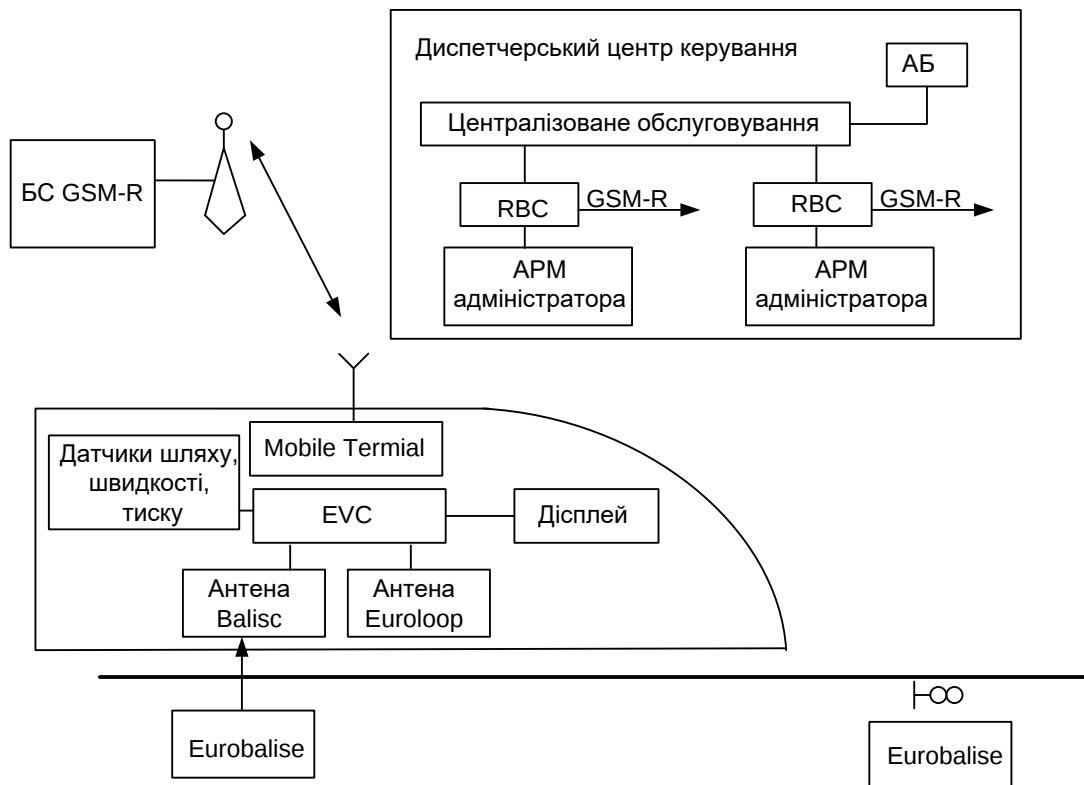


Рисунок 3 – Структура системи ETCS-3

Внаслідок того, що традиційні пристрої контролю місцезнаходження поїзда не застосовуються, для контролю цілісності і довжини поїзда використовується внутрішньопоезний радіоканал.

У зв'язку з обмеженнями пропускної спроможності та у зв'язку з великими очікуваннями економії на інфраструктурі попит на ETCS-3 зростає. ETCS3 забезпечить основу більш високих рівнів автоматизації поїздів, дозволить використовувати рухому блок-ділянку, а це означає, що два поїзди зможуть рухатися поспіль з мінімальними відстанями. Це також дозволяє видалити колійне обладнання для виявлення поїздів, такі як рейкові кола або лічильники осей. Зрештою очікується, що ETCS-3 знизить капітальні витрати та витрати на технічне обслуговування, а також підвищить надійність та оптимізує роботу поїздів за рахунок автономного

водіння, автоматичного регулювання руху поїздів, IP-радіо та супутникового позиціонування.

Основні проблеми полягають у створенні віртуальних блок-ділянок як підрозділів в рамках існуючої архітектури, а також забезпечення високої надійності каналів радіозв'язку [10].

Створення віртуальних блоків покладено на програмне забезпечення. Воно повинно виконувати наступні основні задачі:

- розраховувати координати стану (місцезнаходження, швидкість) на підставі інформації від датчиків;
- проводити екстраполяцію (прогнозувати зміну) координат стану з урахуванням динамічних властивостей (тягових та гальмівних можливостей) поїздів;
- розраховувати план-графік та формувати команди керування рухом поїздів, враховуючи координати стану попереду розташованого поїзда, обмежень швидкості на ділянці, безпеки руху,

– вирішення задач оптимізації параметрів руху поїздів (точність виконання графіку руху поїздів, мінімізація енергозатрат та ін.).

Всі вказані задачі має вирішити не тільки на програмному, а й та апаратному рівнях, перш ніж координатний спосіб регулювання з рухомими блок-ділянками буде впроваджено у стандартний спосіб роботи. Проте дана система знаходиться в експериментальній стадії і на сьогодні не була впроваджена на жодній ділянці залізниць світу.

Висновки

За проведенням аналізом встановлено, що жодна з систем, що знаходяться в експлуатації, не забезпечує виконання функції розрахунку допустимої швидкості руху поїзда до хвоста попереду розташованого поїзда, тобто вони є системами з фіксованими блок-ділянками, які за основними принципами функціонування мало відрізняються від традиційних інтервальних систем регулювання рухом поїздів. Основні проблеми в реалізації систем з рухомими блок-ділянками полягають у створенні віртуальних блок-ділянок на програмному та апаратному рівнях, а також забезпечення високої надійності каналів радіозв'язку

Література

- 1 Ходжаєв У. Система ITCS. Інтелектуально-інтервальне управління рухом / У. Ходжаєв, П. Томас // Автоматика, зв'язок, інформатика. – 2006. – №8. – С. 48-49.
- 2 Lacot F. ERTMS wird Reailitat / F. Lacot, J. Pore // Signal und Draht. – 2004. – №10. – S. 6-12.
- 3 Кисільгоф Г. К. Застосування SCADA при розробці спеціального програмного забезпечення АБТЦ-МШ / Г. К. Кисільгоф, І. М. Кравець, Т. В. Абрамова // Автоматика, зв'язок, інформатика. – 2017. – №10. – С. 5-8.
- 4 European Train Control System [Electronic resource] / Access mode: <https://www.thalesgroup.com/en/european-train-control-system-etc23>
- 5 ETCS Levels and Modes - European Commission.html [Electronic resource] / Access mode: https://transport.ec.europa.eu/transport-modes/rail/ertms/what-ertms-and-how-does-it-work/etcs-levels-and-modes_en
- 6 Хромушкін К. Д. Система інтервального регулювання на базі радіоканалу / К. Д. Хромушкін, Є. В. Павлов // Автоматика, зв'язок, інформатика. – 2007. – №11. – С. 7-9.
- 7 Тільк І. Г. Система інтервального регулювання руху поїздів / І. Г. Тільк, В. В. Ляний // Автоматика, зв'язок, інформатика. – 2009. – №1. – С. 24.
- 8 Шухіна Є. Є. Результати експлуатації мікропроцесорної системи автоблокування АБТЦ-

МШ / Є. Є. Шухіна, А. В. Марков, С. В. Маршов // Автоматика, зв'язок, інформатика. – 2014. – №6. – С. 8-12.

9 Розенберг О.М. Комплексні локомотивні системи безпеки/Є.М. Розенберг, Є. Є. Шухіна, Г.К. Кисільгоф // Автоматика, зв'язок, інформатика. – 2014. – №10. – С. 2-4.

10 When will we see ETCS Level 3 train control systems? [Electronic resource] / Access mode: <https://www.arcweb.com/industry-best-practices/when-will-we-see-etc3-level-3-train-control-systems>

Ключові слова: координатні системи регулювання, інтервальне регулювання, рухомі блок-ділянки, автоматичне регулювання руху поїздів, канал радіозв'язку.

Khismatulin V., Sagaidachnyi V., Pelekh V. Comparative characteristics and problems of constructing coordinate train control systems traffic.

A brief description of the main options for constructing and structuring coordinate systems for train traffic control is given. It has been established that systems with moving block sections can provide the greatest throughput. In such systems, block sections exist only in mathematical models, which makes it possible to create the boundaries and lengths of block sections by calculating the coordinates of the tail of the train ahead and the length of the minimum allowable guard interval, taking into account the real characteristics of both trains.

A list of functions performed in coordinate train traffic control systems with moving block sections is determined. Among them, an important place is occupied by operations related to obtaining and processing coordinate information - determining the coordinates of the head and length of the train, calculating the allowable speed of the train to the tail of the train ahead.

The main problems are in creating software for calculating virtual block sections as units within the existing architecture, as well as ensuring high reliability of radio communication channels. The main components of the software necessary for calculating virtual block sections are given. It should calculate the state coordinates (location, speed) based on information from sensors. Based on the results of the assessment of the state coordinates, it is necessary to extrapolate them taking into account the dynamic properties (traction and braking capabilities) of trains. Coordinate information is also the basis for forming train traffic control commands and solving problems of optimizing train traffic parameters (accuracy of train schedule execution, minimization of energy consumption, etc.).

An analysis of the practical implementation of coordinate methods for regulating train traffic in systems operated in the world has been conducted. The analysis results show that today only in the European ETSC-3 system the minimum inter-train interval is determined based on the calculation of the braking distance length and the tail coordinates of the train in front, which significantly increases the throughput of the section. Due to capacity limitations and high expectations of savings on the infrastructure, the demand for ETCS-3 is growing. It also allows for the removal of trackside equipment for train detection, such as rail wheels or axle counters. However, it is still in development because there are a large number of implementation challenges.

Keywords: coordinate train control systems, interval control, moving block sections, automatic control of train traffic, radio communication channel.

Хісматулін Володимир Шайдуллович, кандидат технічних наук, професор, професор кафедри автоматики та комп'ютерного телекерування рухом поїздів Українського державного університету 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 Українського державного університету 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 Українського державного університету 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 remote 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 remote 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 remote control of train traffic, Ukrainian State University of Railway Transport, Kharkiv, Ukraine.

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

e-mail: vpeleh@gmail.com

Кандидати техн. наук БОНДАРЕНКО В.В., ВІЗНЯК Р.І., СКУРІХІН Д.І.,
Д-Р ТЕХН. НАУК РАВЛЮК В.Г.,
СТУД. БОНДАРЕНКО С.В.
(Український державний університет залізничного транспорту)

Теоретичні основи оцінювання проєктної надійності електронної апаратури пасажирських вагонів

Анотація. Авторами статті розроблено методику оцінювання проєктної надійності електронної апаратури пасажирських вагонів. За її допомогою проведено дослідження проєктної надійності найбільш важливих електронних блоків пасажирського вагона – регулятора напруги генератора, блока реле частоти, блока регулювання заряду акумуляторної батареї та блока захисту. Ця методика є універсальною, враховує експлуатаційні коефіцієнти електронного обладнання та може бути використана для оцінювання надійності електронної апаратури не тільки вагонів локомотивної тяги, але й іншого рухомого складу залізниць. Запропоновано технологію діагностування електрообладнання вагона, що враховує отримані розрахунком показники надійності електронних блоків вагона та визначає послідовність діагностування електронної апаратури.

Ключові слова: пасажирський вагон, електричне та електронне обладнання, електронні блоки, надійність електронних блоків, показники надійності, інтенсивність відмов, діагностика.

Вступ

Сучасний суцільнометалевий пасажирський вагон є складною інженерною конструкцією, що містить комплекс механічних, електричних та електронних систем. Безвідмовна робота електричного та електронного обладнання пасажирських вагонів залежить від ефективності конструкції комплексу електрообладнання і системи його технічного обслуговування та ремонту. Постійне удосконалення електрообладнання пасажирських вагонів, пов'язане з підвищенням безпеки руху та комфортних умов пасажирів, призвело до створення складних електронних пристроїв автоматичного керування, контролю та захисту. У зв'язку з цим виникає необхідність оцінювання показників надійності електронної апаратури, що дає змогу розробляти заходи, спрямовані на її підвищення.

Аналіз останніх досліджень і публікацій.

Як відомо, останнім часом на залізничному транспорті України однією з важливих є проблема надійності пасажирських вагонів. Ураховуючи дію воєнного стану та складну економічну ситуацію у країні, фінансування на придбання нових пасажирських вагонів для залізниць України значно зменшилося.

У результаті цього, за даними останніх досліджень, знос пасажирських вагонів інвентарного парку АТ «Укрзалізниця» становить 93,1 %. Його старіння триває швидкісними темпами і не компенсується надходженням нових вагонів. Найбільше відпрацювали нормативний строк служби вагони відкритого типу (плацкартні) – їх близько 32,96 % [1]. Ураховуючи незадовільний стан парку пасажирських вагонів, у роботі наведено результати досліджень, спрямованих саме на підвищення їхньої надійності. Основна частка досліджень присвячена дослідженню проєктної надійності електронної апаратури (електронних блоків) комплексу електрообладнання пасажирського вагона та використанню результатів розрахунку для удосконалення технології діагностування електрообладнання вагонів. Використання результатів досліджень, за нашими оцінками, дасть змогу підвищити надійність і готовність вагонів в експлуатації.

Проблемам забезпечення надійності рухомого складу залізниць були присвячені роботи П. В. Шевченка, Е. Д. Тартаковського, В. Ф. Головка, І. Е. Мартинова, А. Б. Бабаніна, М. М. Соколова, В. В. Дурова та ін.

У роботі [2] розглянуто зв'язок між надійністю і безпечністю спеціалізованих комп'ютерних систем залізничної автоматики з

ретельним аналізом апаратних і програмних заходів підвищення безпечності компонентів і систем. Основну увагу приділено аналізу методів і засобів досягнення заданого рівня безпечності сучасних систем залізничної автоматики з електронними компонентами. Основний акцент зроблено на оцінювання надійності і безпечності наземної електронної апаратури. У свою чергу проблеми випробувань комплексів технічних засобів керування та регулювання руху поїздів на прикладі електронних реле розглянуті в роботі [3]. Проблемам підвищення надійності вагонів конструктивними методами присвячені роботи [4-7]. Водночас у цих роботах завдання надійності електронної апаратури пасажирських вагонів не розглядали.

Аналіз методик, використовуваних останнім часом для розрахунку надійності систем залізничної автоматики з електронними компонентами, наведений у роботі [8]. Зазначено, що випробування електронних виробів залізничної автоматики передбачає оцінювання показників їхньої функційної безпечності та надійності розрахунковим методом. Для цього застосовують галузеву «Методику доказу функційної безпечності мікроелектронних комплексів систем керування та регулювання руху поїздів». При цьому вказано, що не всі дані з методики можуть бути коректно застосовані в розрахунках вітчизняних розробників і дослідників, особливо в різних галузях. Був проведений порівняльний аналіз розрахункових формул і сформульовані висновки щодо адаптації співвідношень із

методики до вітчизняних вимог. Основні загальні поняття надійності визначені державними стандартами України [11-13].

Однак у наукових роботах і методиках, що наведені вище, не розглянуто розрахунок проектної надійності електронних блоків вагонів та особливості їхньої роботи з урахуванням експлуатаційних факторів. Експлуатаційні фактори, які впливають на надійність електронної апаратури вагонів, відрізняються від факторів, що впливають на стаціонарну шляхову наземну апаратуру керування, це потрібно також урахувати в розрахунках.

Мета дослідження.

Метою дослідження є розроблення методики розрахунку проектної надійності електронних блоків пасажирського вагона та перевірка її адекватності, застосування цієї методики та розрахованих показників надійності для діагностування електрообладнання пасажирського вагона.

Основна частина дослідження.

Електрообладнання сучасного пасажирського вагона є різноманітним і складним за своєю будовою. Існує багато різних комплексів електрообладнання вітчизняного та закордонного виробництва. На рис. 1 наведений пулт та електронні блоки одного з відомих комплексів електрообладнання ЭВ.10.02, що встановлені на багатьох пасажирських вагонах відкритого типу.



а) Пулт керування вагона



б) Електронні блоки

Рис. 1. Пулт керування (а) та електронні блоки (б) пасажирського вагона

Комплекси електрообладнання постійно оновлюють і вдосконалюють. На вітчизняних пасажирських вагонах прискореного руху використовують більш сучасні розподільні щити систем автоматизованого керування, контролю і діагностики (ШР САУКД), побудовані в

НПП «Хартрон-Експрес». Також проходять модернізацію комплекси ЭВ.10.02 і замінюються на ЭВН 10.003 для використання у складі некупежного пасажирського залізничного вагона, які проходять капітальні види ремонту. Усі

системи електрообладнання, які використовують на залізницях України, подано на рис. 2 [9].

Система енергозабезпечення сучасних вагонів	Низьковольтні джерела електроенергії		Високовольтні джерела електроенергії
	Основне	Резервне	
Автономна (змішана) без кліматичної установки (U=50 В)	Генератор 8-12 кВт, 240-270 кг	Акумуляторна батарея 15 кВт*год, 650 кг	Високовольтна магістраль поїзда (для живлення комбінованого котла опалення)
Автономна (змішана) з кліматичною установкою (U=110 В)	Генератор 30-35 кВт, 700-900кг	Акумуляторна батарея 33-38 кВт*год, 1450 кг	
Централізована з кліматичною установкою	Статичний перетворювач 45 кВт, 1200 кг		Високовольтна магістраль поїзда (для живлення статичного перетворювача)

Рис. 2. Типові системи енергозабезпечення пасажирських вагонів

Тепер на залізницях України найбільш широко експлуатують пасажирські вагони без кондиціонування повітря з генератором змінного струму і номінальною напругою мережі $U = 50$ В, що мають комплекс електрообладнання ЭВ.10.02. Таких вагонів близько 62 %. За даними прес-служби АТ «Укрзалізниця», із 3100 вагонів, які використовують для пасажирських перевезень на залізницях України, лише 1168 обладнані кондиціонерами [10]. Тому далі розглянемо розрахунок надійності електронної апаратури такого комплексу електрообладнання.

Уся електронна апаратура вагона виконана за блоковим принципом і залежно від функціонального призначення поділена на такі основні блоки: блок захисту (БЗ), блок регулятора напруги генератора (БРНГ), блок реле частоти (БРЧ) і блок реле температури (БРТ). Інші електронні блоки мають другорядне значення в системі електрообладнання вагона. Тому оцінювали надійність вищевказаних чотирьох блоків.

З визначенням надійності електронних блоків необхідно розрізнити проєктну надійність, тобто розраховану теоретично за даними інтенсивності відмов елементів, та експлуатаційну надійність для умов експлуатації вагона з урахуванням реальних режимів навантаження.

Дослідження експлуатаційної надійності електронної апаратури вагона пов'язані з великими труднощами, оскільки апаратура має порівняно невеликий відсоток відмов в експлуатації. У зв'язку з цим для оцінювання надійності потрібне проведення тривалих спостережень за сукупністю

вагонів в експлуатації. З огляду на вищевикладене, на першому етапі вважаємо за необхідне теоретично оцінити надійність електронних блоків, а надалі, за наявності статистики відмов блоків в експлуатації, порівняти проєктну (розраховану теоретично) і експлуатаційну надійності. Це дасть змогу розробити рекомендації щодо її підвищення.

Електрообладнання пасажирського вагона являє собою постійно діючу апаратуру, яка відновлюється за результатами перевірок. У технічних умовах на комплекс електрообладнання ЭВ.10.02 вимоги до надійності такі:

- середній наробіток до відмови – не менше 610000 км;
- коефіцієнт готовності – не менше 0,99;
- термін служби – не менше 20 років;
- встановлений безвідмовний наробіток протягом шести місяців з початку експлуатації – не менше 400000 км.

Як основний показник, що характеризує безвідмовність електрообладнання вагона, задано показник – середній наробіток до відмови, нормований за елементами, що входять до складу вагона.

Для оцінювання показників надійності електронних блоків доцільно виділити два основних етапи:

1. Нормування надійності;
2. Розрахунок надійності.

Нормування надійності дає змогу визначити кількісне значення середнього наробітку до відмови, що припадає на блоки сумарно, із загального значення показника, заданого на все електрообладнання вагона, тобто

провести нормування надійності. Як вихідні дані для нормування і розрахунку проектної надійності електронних блоків були використані:

- структурні схеми надійності блоків БЗ, БРНГ, БРЧ і БРТ;

- переліки ЕРВ (електро-радіо виробів), що входять до складу блоків;

- переліки інтенсивності відмов використаних ЕРВ;

- режими й умови роботи блоків.

Інтенсивності відмов ЕРВ визначені з урахуванням коефіцієнтів впливу на інтенсивність відмов різних конструктивно-технологічних і експлуатаційних факторів, що впливають на електронні блоки вагона.

За призначенням та умовами експлуатації електронні блоки належать до категорії 1.2 (наземна рухома апаратура). Інтенсивність відмов комплектуючих ЕРВ для цієї категорії визначають за формулою

$$\lambda = \lambda_0 \cdot \prod_{K=1}^n K_k, \quad (1)$$

де λ_0 – базова інтенсивність відмов ЕРВ за $t = +25^\circ\text{C}$;

K_k – коефіцієнти, що враховують вплив на інтенсивність відмов ЕРВ різних конструктивно-технологічних та експлуатаційних факторів.

З метою забезпечення системного підходу до вибору, розрахунку й аналізу коефіцієнтів і значень інтенсивності відмов комплектування ЕРВ для кожного з чотирьох блоків складають відповідну таблицю. Повністю всі таблиці не наводимо через їхній великий обсяг. Фрагмент однієї з таблиць для блоку захисту наведений у табл. 1.

Таблиця 1

Значення інтенсивності відмов комплектування ЕРВ для блока БЗ

Но ме р з/ п	Ти п ЕР В	Кіл ькі сть N	$\lambda_0 \cdot 10^6, 1/\Gamma$ од	Коефіцієнти K_k						$\lambda \cdot K \cdot 10^6, 1/\Gamma$ од	$\lambda \cdot N \cdot 10^6, 1/\Gamma$ од
				5	6	7	8	9	10		
1	Діо ди										
	Д2 23 А	2	0,1	0, 1 5 1	0 , 6	0 , 6	0 , 7	2 , 5	0,0 09 51	0,0 19 02	
...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	
5	Тр анз ис тор и										
	КТ 315 Г	5	0,3	0, 2 7 1	0 , 5	0 , 7	0 , 5	2 , 5	0,0 35 60	0,1 78 00	
...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	
42	Ко нде н- сат ор										
	К5 0- 12- 160 - 50 Мк ф	1	0,0 5	0, 0 2 6	1 , 0	-	-	2 , 5	0,0 32 5	0,0 32 5	
Інтенсивність відмов блока захисту (БЗ)										1,3 93 93	

Результати розрахунку інтенсивності відмов електронних блоків подані на рис. 3. У розрахунках використовували програмні пакети Statistica та Microsoft Office (Excel).

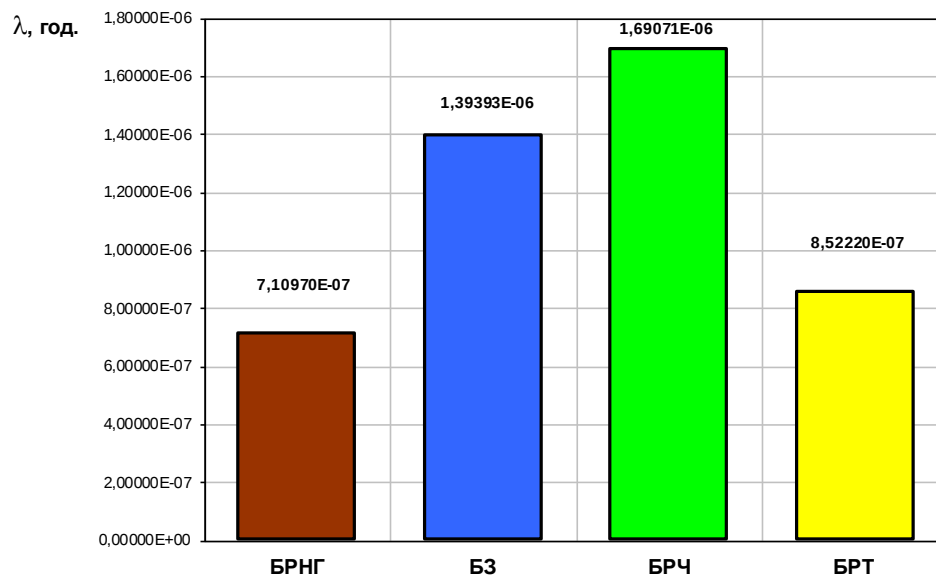


Рис. 3. Діаграма розподілу інтенсивності відмов електронних блоків

З діаграми видно, що найменш надійним є блок БРЧ, а найбільш надійним – БРНГ. Сумарна інтенсивність відмов усіх електронних блоків складає $4,64783 \cdot 10^{-6}$ 1/год. Задане в ТУ кількісне значення наробітку до відмови на все електрообладнання вагона складає 35040 год (на підставі того, що 300000 км приблизно відповідає двом рокам експлуатації вагона). Тоді з формули $\lambda = 1/T$ випливає, що задана інтенсивність відмов складає $\lambda = 28,538 \cdot 10^{-6}$ 1/год. На частку електронних блоків припадає приблизно 16 % комплектування ЕРВ вагона (виходячи з інтенсивності відмов комплектування ЕРВ).

На підставі вищевикладеного був визначений нормований показник надійності електронних блоків – середній наробіток до відмови. Результат подано в табл. 2.

Таблиця 2

Нормоване значення середнього наробітку до відмови електронних блоків

Задане значення T_c , год	Нормоване значення T_c , год	
	Електронні блоки	Інша апаратура
35040	200000	43000

Отже, відповідно до заданого кількісного значення показника надійності на все електрообладнання вагона нормоване значення середнього наробітку до відмови електронних блоків складає 200000 год.

В основу розрахунку показників надійності електронних блоків був покладений

імовірнісний метод кількісного оцінювання надійності. При цьому прийняте допущення, що час виникнення відмов підлягає експоненційному закону розподілу, для якого справедлива умова $\lambda(t) = \text{const}$, тобто інтенсивність відмов постійна в часі. Для нерезервованої апаратури, до якої належать електронні блоки, середній наробіток до відмови T_c визначають за формулою

$$T_c = \frac{1}{\sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^n N_{ji} \cdot \lambda_{ji}}, \quad (2)$$

де n – кількість типів ЕРВ, що входять у j -й блок;
 m – кількість блоків;

N_{ji} – кількість ЕРВ i -го типу, що належать

j -му блоку;

λ_{ji} – інтенсивність відмов ЕРВ i -го типу, що належать j -му блоку.

Розрахунок показника надійності T_c здійснюється відповідно до структурних схем надійності (ССН) кожного з електронних блоків. ССН компонентів електронних блоків вагона і кожного блока окремо подано на рис. 4-8.

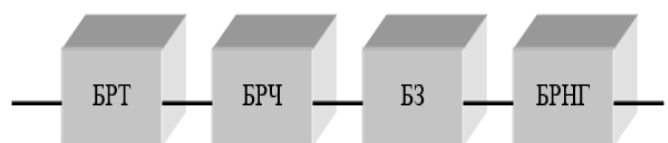


Рис. 4. Структурна схема надійності електронних блоків вагона

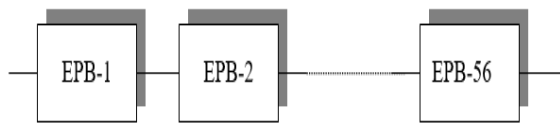


Рис. 5. Структурна схема надійності блока БРЧ

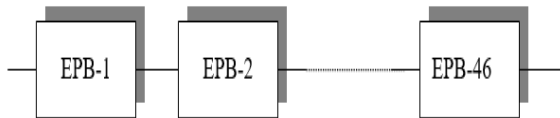


Рис. 6. Структурна схема надійності блока БРТ

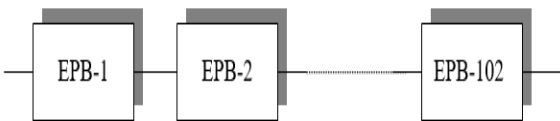


Рис. 7. Структурна схема надійності блока БЗ



Рис. 8. Структурна схема надійності блока БРНГ

У розрахунках надійності електронних блоків ураховані:

- коефіцієнти теплових, механічних та електричних навантажень;
- кількість пайок у блоках (інтенсивність відмов пайки $\lambda = 10^{-10}$ 1/год).

Результати розрахунку інтенсивності відмов електронних блоків і середнього наробітку до відмови наведені в табл. 3.

Таблиця 3

Результати розрахунку інтенсивності відмов і середнього наробітку до відмови електронних блоків вагона

№	Блок	Інтенсивність відмов $\lambda_{\text{бл}}$, 1/год	Середній наробіток до відмови T_c , год
1	Реле частоти (БРЧ)	$1,69071 \cdot 10^{-6}$	591467
2	Реле температури (БРТ)	$0,85222 \cdot 10^{-6}$	1173396
3	Захисту (БЗ)	$1,39393 \cdot 10^{-6}$	717411

4	Регулятора напруги генератора (БРНГ)	$0,71097 \cdot 10^{-6}$	1406529
Разом		$4,6956 \cdot 10^{-6}$	212965

Сумарне чисельне значення інтенсивності відмов блоків наведено з урахуванням інтенсивності відмов пайок.

Отже, відповідно до отриманих характеристик задана вимога з надійності виконана, тобто розраховане значення середнього наробітку до відмови $T_c = 212965$ год і нормоване значення $T_c = 200000$ год практично рівні (з довірчою імовірністю 0,9).

Проведені розрахунки доводять коректність запропонованої методики розрахунку. Наступним кроком проведення подальших досліджень буде порівняння проектної надійності електронних блоків вагона з експлуатаційною надійністю, розрахованою за результатом аналізу статистичних даних про відмови, і надання рекомендацій з підвищення надійності електронної апаратури вагона. Одним з ефективних заходів із підвищення експлуатаційної надійності електрообладнання пасажирських вагонів є впровадження сучасних технологій, методів і засобів технічного діагностування.

Практичне значення роботи.

Проведене оцінювання надійності електронної апаратури вагонів дасть змогу в подальшому оцінити їхній залишковий ресурс і, за необхідності, впливати на надійність конструктивними або експлуатаційними методами. За результатом проведеного розрахунку інтенсивності відмов і середнього наробітку до відмови електронних блоків можна надати рекомендації щодо послідовності діагностування та контролю технічного стану електронних блоків для технічного обслуговування та ремонту електрообладнання вагонів. Діагностування та контроль має відбуватись у порядку збільшення надійності електронних блоків: БРЧ, БЗ, БРТ, БРНГ (від менш надійного блока до більш надійного) (рис. 9).

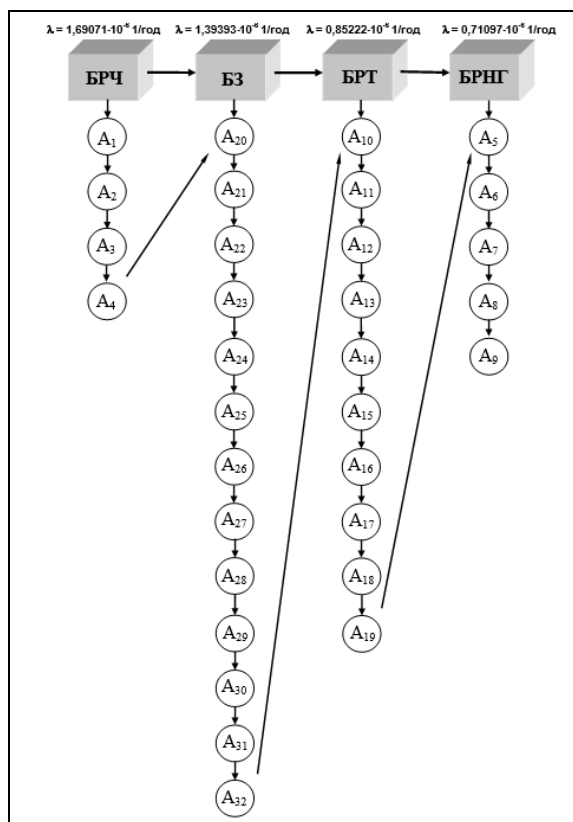


Рис. 9. Технологія діагностування електронних блоків, що враховує їхню надійність

На рис. 9 БРЧ, БЗ, БРТ, БРНГ – електронні блоки, що підлягають діагностуванню; $A_1 \div A_{32}$ – перелік параметрів електронних блоків, що підлягають контролю за прийнятою методикою випробувань заводу-виробника. Запропонована технологія діагностування дасть змогу зменшити час на пошук несправностей і відмов електронних блоків, відновлення комплексу електрообладнання вагона та підвищити експлуатаційну готовність вагона.

Висновки.

Розроблено та апробовано методику розрахунку проектної надійності електронної апаратури пасажирських вагонів, у рамках якої проведено нормування надійності електронних блоків і розраховано параметри надійності з урахуванням експлуатаційних коефіцієнтів. Отримані результати розрахунку проектної надійності електронних блоків дадуть змогу в подальшому провести порівняльний аналіз її з експлуатаційною надійністю з надходженням достатнього статистичного матеріалу та розробити заходи (конструктивні або експлуатаційні) щодо її підвищення. Запропоновано технологію діагностування електрообладнання вагона, що враховує отримані розрахунком показники надійності електронних блоків вагона і визначає

послідовність діагностування електронної апаратури.

Список використаних джерел

1. Лупітько Н. В., Сладких І. В. Дослідження сучасного стану інвентарного парку пасажирських вагонів АТ «Укрзалізниця». *Збірник наукових праць. Рейковий рухомий склад*. Кременчук: ДП «УкрНДІВ», 2020. Вип. 21. С. 28-43.
2. Мойсеєнко В. І., Бутенко В. М. Безпечність спеціалізованих комп'ютерних систем: навч. посіб. Харків: УкрДУЗТ, 2021. 112 с.
3. Проблеми випробувань комплексів технічних засобів керування та регулювання руху поїздів / В. І. Мойсеєнко, В. М. Бутенко, О. В. Головка, С. Г. Чуб. *Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті*. 2020. Т. 25, № 3. С. 31 – 38. ISSN: 2413-3833.
4. Panchenko S., Gerlici J., Lovska A., Ravlyuk V. The service life prediction for brake pads of freight wagons. *Communications. Scientific Letters of the University of Zilina*. 2024. Vol. 26 (2). P. B80 – B89. <https://doi.org/10.26552/com.C.2024.017>.
5. Development of a Procedure for Determining the Pre-Failure Condition of the Axle Boxes of Railway Rolling Stock / I. Martynov, J. Gerlici, A. Trufanova, V. Petuhov, V. Shovkun, K. Kravchenko. *Komunikácie - vedecké listy Žilinskej univerzity v Žiline*. 2022. 24(1). P. B87-B93. DOI: 10.26552/com.C.2022.1.B87-B93.
6. Пасажирські вагони. Надійність: монографія / Ю. Я. Водяніков, А. О. Сулим, П. О. Хозя та ін. Кременчук: ДП «УкрНДІВ», 2023. 69 с.
7. Influence of structural solutions of an improved brake cylinder of a freight car of railway transport on its load in operation / S. Panchenko, G. Vatulia, A. Lovska, V. Ravlyuk, I. Elyazov, I. Huseynov. *EUREKA Phys. Eng.* 2022, 6, 45–55. DOI: 10.21303/2461-4262.2022.002638.
8. Бутенко В. М., Головка О. В., Чуб С. Г. Аналіз методик розрахунку надійності систем залізничної автоматики з електронними компонентами. *Збірник наукових праць Українського державного університету залізничного транспорту*. Харків: УкрДУЗТ, 2023. Вип. 204. С. 115-124.
9. Bondarenko V. V., Skurikhin D., Wojciechowski J. The Application of Lithium-Ion Batteries for Power Supply of Railway Passenger Cars and Key Approaches for System Development. *Smart and Green Solutions for Transport Systems: 16th Scientific and Technical Conference «Transport Systems. Theory and Practice 2019» Selected Papers.- Katowice: Springer International Publishing*. 2020. P. 114-125. DOI: 10.1007/978-3-030-35543-2_10.

10. Прес-служба «Укрзалізниці». 62 % пасажирських вагонів України не обладнані кондиціонерами. URL: https://www.uz.gov.ua/press_center (дата звернення 01.11.2024).

11. ДСТУ 2860-94. Надійність техніки. Терміни та визначення. Київ : Держстандарт України, 1994.

12. ДСТУ 2861-94. Надійність техніки. Аналіз надійності. Основні положення. Київ : Держстандарт України, 1994. 16 с.

13. ДСТУ 2862-94. Надійність техніки. Методи розрахунку показників надійності. Загальні вимоги. Київ : Держстандарт України, 1994. 16 с.

V. V. Bondarenko, R. I. Vizniak, V. G. Ravlyuk, D. I. Skurikhin, S. V. Bondarenko

Abstract. *The article is devoted to one of the important problems in railway transport - increasing the reliability of railway rolling stock. The process of trouble-free operation of electrical and electronic equipment of passenger cars depends on the efficiency of the design of the electrical equipment and its maintenance and repair system. The constant improvement of the electrical equipment of passenger cars, which is related to the improvement of traffic safety and comfortable conditions for passengers, has led to the creation of complex electronic devices for automatic control, control and protection. In this regard, there is a need to assess the reliability of electronic equipment, which allows for the development of measures aimed at its improvement.*

The authors of the article have developed a methodology for assessing the project reliability of electronic equipment of passenger cars. With its help, a study of the design reliability of the most important electronic units of the passenger car was carried out - the generator voltage regulator, the frequency relay unit, the battery charge control unit and the protection unit. This technique is universal, takes into account the operational coefficients of electronic equipment and can be used to assess the reliability of electronic equipment not only of locomotive traction cars, but also of other rolling stock of railways. The obtained results of calculating the design reliability of electronic units will allow to conduct a comparative analysis with operational reliability in the future and to propose measures to increase it if necessary. A technology for diagnosing the electrical equipment of a car is proposed, which takes into account the reliability indicators of the car's electronic units obtained by calculation.

Keywords: *passenger car, electrical and electronic equipment, electronic blocks, reliability of electronic blocks, reliability indicators, failure rate, diagnostics.*

Бондаренко В'ячеслав Володимирович, канд. техн. наук, доцент кафедри інженерії вагонів та якості продукції Українського державного університету залізничного транспорту.

ORCID iD: 0000-0003-4019-4017. Тел.: +38 (057) 730-10-35. E-mail: bondarenko@kart.edu.ua.

Візняк Руслан Іванович, канд. техн. наук, доцент кафедри інженерії вагонів та якості продукції Українського державного університету залізничного транспорту. ORCID iD: 0000-0001-6179-4981.

E-mail: viznyakruslan@kart.edu.ua

Равлюк Василь Григорович, д-р техн. наук, доцент кафедри інженерії вагонів та якості продукції Українського державного університету залізничного транспорту. ORCID iD: 0000-0003-4818-9482.

E-mail: ravg@kart.edu.ua

Скуріхін Дмитро Ігорович, канд. техн. наук, доцент кафедри інженерії вагонів та якості продукції Українського державного університету залізничного транспорту. ORCID iD: 0000-0002-3746-5157.

E-mail: skurikhin@kart.edu.ua

Бондаренко Сергій В'ячеславович, студент Технологіко-гуманітарного університету ім. К. Пулавського у Радомі (Польща). ORCID iD: 0009-0004-6938-4046.

E-mail: serbon2007@gmail.com

Bondarenko Viacheslav, PhD (Tech), Associate Professor, department of Wagon Engineering and Product Quality, Ukrainian State University of Railway Transport. ORCID iD: 0000-0003-4019-4017.

Tel. +38 (057) 730-10-35. E-mail: bondarenko@kart.edu.ua

Viznyak Ruslan, PhD (Tech), Associate Professor, department of Wagon Engineering and Product Quality, Ukrainian State University of Railway Transport. ORCID iD: 0000-0001-6179-4981.

E-mail: viznyakruslan@kart.edu.ua

Ravlyuk Vasyl, Dr. Sc. (Tech.), Associate Professor, department of Wagon Engineering and Product Quality, Ukrainian State University of Railway Transport. ORCID iD: 0000-0003-4818-9482.

E-mail: ravg@kart.edu.ua

Skurikhin Dmytro, PhD (Tech), Associate Professor, department of Wagon Engineering and Product Quality, Ukrainian State University of Railway Transport. ORCID iD: 0000-0002-3746-5157.

E-mail: skurikhin@kart.edu.ua

Bondarenko Serhii, student, Uniwersytet Technologiczno-Humanistyczny im. Kazimierza Pułaskiego w Radomiu, Poland. ORCID iD: 0009-0004-6938-4046. E-mail: serbon2007@gmail.com

Доктори техн. наук БРУСЕНЦОВ В.Г., ПУЗИР В.Г.,
кандидати техн. наук ГРИГОР'ЄВА Є.С., ГАРМАШ Б.К., СЕРІКОВ
Я.О., магістрант КРАМЧАНІН І.Г.

Вплив професійного стресу на рівень функціональної надійності транспортних операторів

Анотація. Досліджено проблему професійної надійності людини-оператора. Встановлено, що добре підготовлений оператор має сильні якості, відсутні в системах зі штучним інтелектом. Через це надійність системи управління за участю людини вища, ніж у системи без людини, навіть із чотириразовим її резервуванням. Розглянуто вплив на формування рівня професійної надійності людини-оператора за стресових ситуацій. Зроблено акцент на тому, що функціональний стан, професійне здоров'я та біологічний вік суттєво залежать від впливу професійного стресу. Запропоновано методи, що зменшують прискорене зношування організму.

Ключові слова: професійний стрес, рівень професійної надійності, рівень фізичного стану, ергономіка, охорона праці, безпека транспортних процесів.

Вступ.

Проблема надійності людини-оператора є актуальною для багатьох галузей. Від початку створення наукового напрямку, що досліджує питання надійності роботи систем управління технічними засобами, її назвали проблемою № 1 для сучасного світу [1]. За цей час створено і ще заплановано створити певну кількість систем управління, що включають людину-оператора. При тому, що сьогодні спостерігається широке впровадження «безпілотних» систем управління, які не включають людину, залишається актуальним вислів відомого американського фахівця в галузі ергономіки А. Чапаніса про те, що добре підготовлений оператор має низку сильних якостей, яких не має штучний інтелект. Тому надійність системи управління за участю людини вища, ніж у системи без людини, навіть із чотириразовим її резервуванням. При цьому так само потрібно враховувати незмірне зростання вартості помилки оператора, що найбільш яскраво показують приклади з цілою низкою техногенних аварій.

Отже можна стверджувати, що надійність роботи систем управління технічними засобами значною мірою визначена надійністю людини-оператора. І чим складніша система, тим зазначена залежність є більш вираженою. Важливо наголосити на тому, що в умовах зростання складності та напруженості операторської діяльності надійність людини зменшується і подекуди суттєво. Це призводить до того, що збільшення надійності технічної частини системи управління часто втрачає сенс, тому що надійність

всієї системи лімітована характеристиками цієї властивості в людини-оператора. І повною мірою зазначені проблеми є актуальними для транспортних систем.

У зв'язку з цим гостро постає проблема контролю рівня професійної надійності транспортних операторів – людей, які управляють складними транспортними системами.

Аналіз останніх досліджень і публікацій.

Проблема надійності людини-оператора особливо є актуальною у зв'язку з тим, що діяльність цілої низки операторських професій характеризується не просто шкідливими, а екстремальними умовами праці, які можуть зумовлювати не тільки зниження надійності працівника, а й прямо чинити шкідливий і небезпечний вплив на людину. Таке положення визначає тісний зв'язок проблем надійності та безпеки праці. Кількість аварій у небезпечних сферах діяльності через помилки людини сягає 90 %, незалежно від причин [2].

Одним із важливих факторів, який формує або суттєво впливає на рівень професійної надійності людини-оператора, є професійний стрес (Occupational Stress). Він впливає на таку найважливішу складову рівня професійної надійності як функціональна надійність, що включає функційний стан, професійне здоров'я та біологічний вік. Проблема впливу професійного стресу безпосередньо на професійну діяльність і професійне здоров'я є гостро актуальною у всьому світі і стає все більш злободенною, набуваючи масштабів епідемії. Приклади впливу професійного стресу вражають – більше 57 % працівників у США страждають на різні

захворювання, і встановлений прямий зв'язок між захворюваннями і стресом [3].

Існують усі підстави для припущення того, що в нашій країні, де умови проживання та виживання більш суворі, ніж у багатьох так само промислово розвинених країнах, відсоток захворювань, викликаних професійним стресом, набагато вищий [4].

Особливої актуальності проблема професійного стресу набуває стосовно транспортних операторів, професійна надійність яких визначає безпеку руху загалом, а отже, виникає проблема збереження значних контингентів людських життів і чималих матеріальних цінностей. Ідеться насамперед про працівників диспетчерського профілю та локомотивних бригад. Цілком послідовно і логічно постає питання про те, як саме професійний стрес впливає на їхнє професійне здоров'я і за допомогою яких методів і заходів запобігти цьому впливу або його мінімізувати.

Відомо, що рівень професійної надійності людини-оператора визначено низкою складових, серед яких найбільш динамічною є функційна надійність. Під цим терміном розуміють властивість функційних систем людини-оператора забезпечувати її динамічну стійкість у виконанні професійного завдання протягом певного проміжку часу та зі сталою заданою якістю, а формуючими складовими є функційний стан, рівень здоров'я та біологічний вік [5].

Однією з найважливіших складових функційної надійності є рівень здоров'я. Ряд публікацій робіт показує, що у зв'язку з комплексом обставин соціального та екологічного плану рівень здоров'я населення України загалом суттєво знизився. Підтвердженням цього є різке зниження тривалості життя українців [6]. Особливо це стосується працівників, чия діяльність пов'язана з вираженням професійним стресом, до яких належить досліджуваний контингент працівників.

Визначення мети та завдання дослідження.

Нормативні вимоги до систем менеджменту здоров'я та охорони праці, до яких насамперед можна віднести міжнародний стандарт ISO 45001, прямо вказують на те, що організація несе відповідальність за здоров'я та безпеку власних працівників і тих, на кого так чи інакше впливає діяльність організації. Зауважимо, що відповідальність керівників є не рекомендацією, а вимогою. До того ж дія стандарту ISO 45001 поширена так само на підтримку та захист фізичного і розумового здоров'я працівників [7].

З огляду на це, оцінювання того впливу, який чинить професійний стрес на рівень функційної надійності транспортних операторів

(зокрема на таку її складову, як професійне здоров'я), і внесення пропозицій стосовно заходів щодо нівелювання його негативного впливу набуває особливої актуальності.

Основна частина дослідження.

Професійний стрес, тобто такий, що прямо чи опосередковано пов'язаний із роботою, робочим місцем, відносинами в колективі, по суті є реакцією людей, коли їм висувають робочі вимоги і чинять тиск, що не відповідають знанням і здібностям працівника, кидають виклик їхній здатності справлятися із ситуацією, змушують надмірно напружуватися. Безумовно, стрес виникатиме в різних робочих обставинах, але часто він надмірно посилюється, коли співробітники відчують, що в них недостатньо підтримки з боку керівників і колег, а також у ситуації, коли мало дієвого контролю за робочими процесами. Часто плутають поняття «тиск» («виклики») і «стрес», іноді таку плутанину в тлумаченнях використовують керівники для виправдання особистого поганого управління [8].

Аналіз літератури дає змогу стверджувати, що завжди існує потенційно небезпечний вплив професійного стресу на професійне здоров'я транспортних операторів. При цьому під професійним здоров'ям розуміють «властивість організму зберігати необхідні компенсаторні та захисні механізми, що забезпечують професійну надійність і працездатність людини в усіх умовах професійної діяльності (як сприятливих, так і несприятливих)». З одного боку, це свідчить про те, що за можливості професійний стрес (особливо надмірний) треба якомога швидше виключити з виробничої діяльності. З іншого боку, доведено, що без стресу людина не може не лише працювати, а й жити.

Відомо, що власне термін «стрес» був запропонований Г. Сельє в 1936 р. Науковець у такий спосіб позначав «синдром, викликаний різними шкідливими агентами», який згодом отримав популярність як «загальний адаптаційний синдром» (*general adaptation syndrome, GAS*) або «синдром біологічного стресу», що має три фази перебігу [9]:

- 1) реакція тривоги;
- 2) фаза опору;
- 3) фаза виснаження.

Біологічна доцільність стресу полягає в енергетичному забезпеченні діяльності, мобілізації ресурсів. Через неоднозначність трактування поняття «стрес» і надмірну обтяженість його різними уявленнями фахівці вважають за потрібне поняття «стрес» замінити поняттям «психічна напруженість». Залежно від характеру впливу на діяльність розрізняють два види такої напруженості – напруга та напруженість. Напругою називають стан, що надає позитивний,

мобілізує ефект впливу на діяльність. Відповідно напруженість – такий стан, що характеризується зниженням стійкості психічних і рухових функцій, аж до дезінтеграції діяльності [10].

Виділяють стрес біологічний і психічний, які відрізняються один від одного особливостями того стимулу, який переважає за впливом, механізмом виникнення і характером реакції у відповідь. Фізіологічний стрес характеризується порушенням гомеостазу та виникає внаслідок безпосереднього впливу неприємного стимулу на організм. Психологічний стрес – це вид психічної напруженості, що з'являється в людини під впливом факторів, які мають характер загрози чи перешкоди.

На відміну від фізіологічного стресу, у якому реакції є високо стереотипними, за психологічного стресу вони індивідуальні, і виникає складність їх прогнозування. На кшталт такого, що на певну загрозу в одного працівника виникає реакція гніву (найчастіше така реакція очікувана, бо притаманна працівникові), а інший реагує страхом [11].

Для позначення шкідливого для здоров'я людини рівня стресу застосовують поняття «дистрес» [12].

Через поширення професій із екстремальними умовами праці та підвищеною психічною напруженістю особливу увагу надають вивченню професійного стресу. Як було вже зазначено, до таких професій можна віднести насамперед працівників, що обіймають посади транспортних операторів. Їхня діяльність прямо чи опосередковано пов'язана з численним набором стресогенних факторів, до яких додається необхідність ухвалення рішень із найвищою відповідальністю.

Професійний стрес виникає внаслідок невідповідності (або несумісності) вимог робочого середовища та індивідуальних ресурсів працівника. Встановлено перелік великої кількості факторів, що впливають на виникнення професійного стресу [13]. Такі фактори належать до різних аспектів організаційного, психологічного, фізичного характеру. До переліку стресогенних факторів можна віднести жорсткий часовий режим роботи; ненормований і неритмічний робочий день; фізичну втому; діяльність, пов'язану з необхідністю одночасного виконання різних функцій і дій; необхідність роботи з великою кількістю професійно змістовної інформації; виснаження компенсаторних механізмів, що забезпечують активну увагу, професійну пам'ять, логічне мислення; велике робоче навантаження, невпевненість у роботі; конфлікти з колегами чи керівниками [14]. Більшість цих важелів широко представлені в діяльності транспортних операторів. Одним із

специфічних видів стресорів є праця з вираженим впливом монотонних факторів, що особливо актуально в діяльності працівників локомотивних бригад. Особливе місце займає хронічний виробничий стрес. Його формування включає стадії з негативними наслідками: поступовий перехід від функційного стану організму до напруги, далі до втоми та перевтоми, яка сама по собі вже є патологічним станом через явище акумуляції хронічних ефектів [15].

Унаслідок виникнення професійного стресу спостерігають негативну дію на професійне здоров'я працівника. Це обумовлено тим, що відповідь на стресові фактори з боку організму – вироблення «гормону стресу», найчастіше кортизолу. Коли стрес минає, рівень цього гормону має поступово знижуватися. За тих умов, коли стреси стають частими чи хронічними, рівні гормонів стресу залишаються підвищеними постійно. Така сталість у підвищенні рівнів гормонів стресу не дає змогу організму «спуститися» на колишній рівень у стані спокою, що призводить до зносу на біологічному рівні організму працівника. Процес такого поступового «зносу» організму має наукову назву – алостатичне навантаження. Зростання таких процесів призводить до ослаблення імунної системи, відповідно підвищується ризик виникнення захворювань у цілому, у тому числі серцево-судинних, онкологічних та інших захворювань [16].

Ураховуючи наведене та специфіку роботи транспортних операторів, виникає потреба зафіксувати реальний стан справ стосовно показників функційної надійності у працівників залізниць. Відповідно було проведено низку досліджень у декілька етапів із метою вивчення зазначеного стану у працівників локомотивних бригад.

Зокрема, на базі виробничого структурного підрозділу «Локомотивне депо Ковель» регіональної філії «Львівська залізниця» було обстежено ряд працівників локомотивних бригад. Загальна кількість обстежених становила 133 особи, з яких помічників машиністів – 64 особи, машиністів рухомого складу – 69 осіб. Паспортний вік респондентів – від 21 до 61 року. Усі досліджувані мають належність до певного виду та роду діяльності, однієї гендерної статі.

Для оцінювання рівня нервово-психічної стійкості (НПС) застосовано методику «Прогноз», за В. А. Бодровим, яка має за мету оцінити здатність людини зберігати психічний баланс у стресових ситуаціях. Вона орієнтована на вимірювання психологічних ресурсів, які сприяють стресостійкості: здатність до концентрації, самоконтролю, адаптація до стресу та розвинені навички саморегуляції.

Результати обстеження показали, що найбільш адаптованими до стресових ситуацій є група працівників із загальним стажем роботи від 10 до 25 років (28 %), однак у цих межах стажу роботи і досить високий відсоток тих, у кого спостерігається схильність до зривів в екстремальних ситуаціях (21 %). Розподіл же за віковими категоріями свідчить, що серед працівників середньо-молодого та середнього віку співвідношення хорошої стресостійкості (33 %) і зниженої (29 %) майже однакове. Загалом така ситуація не може не викликати занепокоєності стосовно рівня НПС локомотивних бригад і потребує певних корегувальних заходів.

Один з етапів передбачав оцінювання рівня здоров'я, формуючим показником якого був прийнятий «Рівень фізичного стану» (*level of*

physical condition, LPhC) [17]. Такий показник відрізняється від інших цілою низкою переваг, бо не потребує застосування складної апаратури; не передбачає фізичного навантаження, що дає змогу проводити обстеження будь-кого з людей; не втомлює обстежуваного; не потребує присутності лікаря. При цьому він має високу кореляцію з велоергометричним стрес-тестом на рівні 0,896 ($P \leq 0,0001$).

Обстеження рівня здоров'я працівників локомотивних бригад у кількох депо показав, що понад 40 % із них мають *level of physical condition* на рівні «нижчий за середній» і «низький» [18]. На рисунку наведено результати дослідження *level of physical condition*.

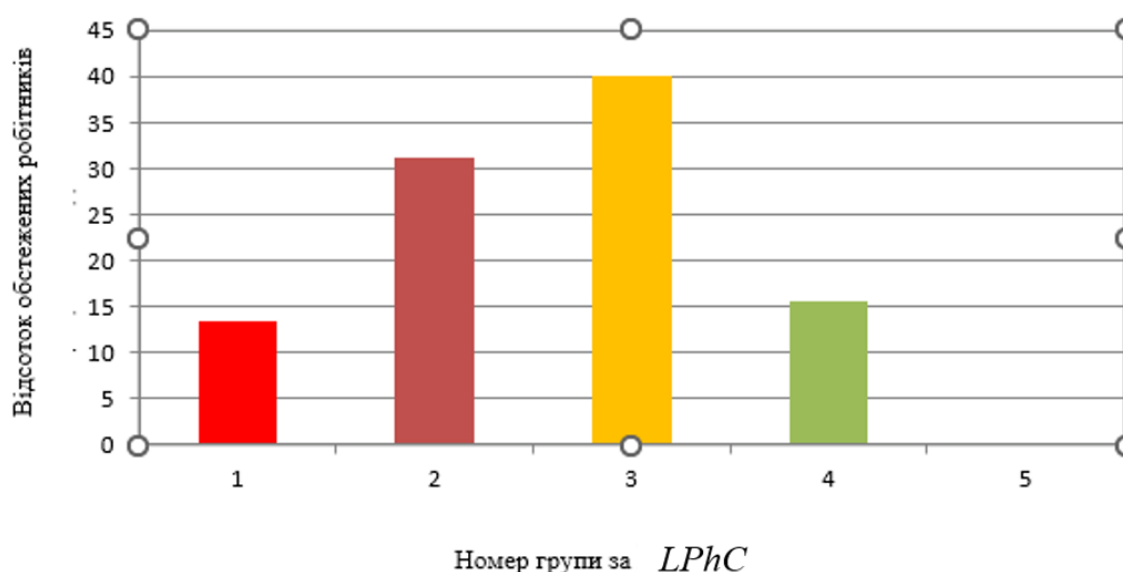


Рис. Розподіл показника *LPhC* в групі працівників локомотивних бригад:

1) низький *LPhC*; 2) нижчий від середнього *LPhC*; 3) середній *LPhC*; 4) вищий за середній *LPhC*; 5) високий *LPhC*

Ще одним наслідком негативної дії професійного стресу на організм працівника слід вважати прискорене зношування організму, що виявляється в перевищенні біологічного віку над метричним. Таке прискорене зношування організму підтверджують результати іншого етапу дослідження, під час якого було обстежено велику групу працівників локомотивних бригад. Встановлено перевищення біологічного віку над метричним у середньому у групі на 10,2 років. Привертає увагу той факт, що в обстежуваних працівників віком до 30 років таке перевищення виявилось більш вираженим і становило в середньому 14 років. Водночас середнє перевищення біологічного віку над метричним у межах країни становило сім років. Отримані результати можна вважати експериментально встановленим підтвердженням негативної дії, яку

чинить професійний стрес на функційну надійність залізничних операторів.

До такого висновку стосовно негативного впливу від професійного стресу на здоров'я працівників дійшли й інші фахівці в галузі ергономіки [19].

Постає питання про розроблення засобів протидії такому впливу. Стратегія боротьби має бути побудована на основі системних рішень, включно із засобами діагностики психофізіологічного статусу, функційного та психоемоційного стану працівника, оптимізації трудового процесу водночас із мінімізацією факторів, що провокують професійний стрес, і застосуванням методів і засобів боротьби зі стресом і його наслідками.

Діагностика психофізіологічного статусу передбачає одночасно оцінювання рівня здоров'я та біологічного віку. Багато організацій

застосовують такий підхід вже під час приймання на роботу [20]. У процесі трудової діяльності з тією самою метою застосовують методи експрес-обстеження, що займають мало часу, але мають досить високу інформативність і надійність [21]. Прикладом таких засобів можна назвати *level of physical condition* і визначення біологічного віку від Київського інституту геронтології [22].

Високу ефективність демонструє застосування психологічних тестів. Це обумовлено тим, що самовідчуття людиною свого здоров'я є по суті об'єктивним показником. Зразком такого роду тестів може бути Гіссенівський опитувальник соматичних скарг, що дає змогу за допомогою відповідей на 24 питання про негативні відчуття людини з боку здоров'я оцінити імовірність того, що працівник уже потребує контакту з медичним фахівцем, а головне – визначає профіль такого фахівця. За результатами обстеження за допомогою опитувальника отримують оцінки за такими шкалами [23]: 1. «Виснаження». 2. «Шлункові скарги». 3. «Ревматичний фактор». 4. «Серцеві скарги». 5. «Тиск» (інтенсивність) скарг.

Серед засобів боротьби з професійним стресом найбільш фізіологічним та ефективним вважають фізичну активність. Обумовлено це тим, що разом із м'язовою роботою з крові інтенсивно виводяться гормони стресу. Отже, організм приводиться у спокійний стан. Нині потреба в застосуванні такого засобу боротьби зі стресом, як фізична активність, стрімко зростає через поширення гіподинамії – нестачі фізичної активності.

Відомо, що фізична неактивність є одним із провідних факторів ризику виникнення неінфекційних захворювань і смертності у всьому світі. До того ж регулярна фізична активність сприяє зниженню ризику виникнення багатьох видів раку на 8–28 %; хвороб серця та інсульту – 19 %; діабету – 17 %, депресії та недоумства – 28–32 % [24].

Для того щоб застосування фізичних навантажень було вчасним і доречним, а також не призвело до негативних результатів, розроблена достатня кількість систем дозування навантажень залежно від наявного рівня здоров'я [25].

Високу ефективність показують лазневі процедури. Окрім того, що сама по собі лазня – найкращий засіб для зняття стресу, вона ще має цілий набір дієвих впливів, що оздоровлюють організм людини: антидепресивний ефект, загальне підвищення імунітету, зниження ризику серцево-судинних захворювань. На жаль, у виробничих підрозділах залізниць майже втрачено позитивний досвід використання оздоровчих комплексів (включно спортивних, лазневих, реабілітаційних).

Існує великий набір засобів впливу через психіку: методики зниження нервово-психічної

напруги у співробітників; гармонізація міжособистісних відносин, сприятливий психологічний клімат у колективі; психогігієнічний варіант аутогенного тренування, нервово-м'язова релаксація, усвідомленість і медитація, моніторинг симптомів і факторів стресу.

Особливий інтерес має метод біологічного зворотного зв'язку (*biofeedback*) – напрям у медицині, що дає змогу людині виробити навички самоуправління власним організмом. Сутність методу полягає в навчанні людини довільно управляти деякими «некерованими» функціями організму: пульсом, електричною активністю мозку, шкіри, м'язів. За допомогою спеціальних технічних і програмних засобів людині надають інформацію про реакцію певних показників на її власні психічні зусилля. Тож під час управління такими функціями людина довільно змінює рівень активації певної регулюючої системи організму. Опанувавши регулювання електричної активності шкіри, можна знижувати рівень активації симпатичної нервової системи, призводячи організм до повного розслаблення. Це ефективний, безпечний, стійкий, немедикаментозний засіб розвитку функційних і адаптаційних можливостей організму. Встановлено, що вже після п'яти-шести сеансів *biofeedback*-тренінгів люди відзначають зниження психоемоційної напруги та зникнення симптомів, які мучили їх протягом великого терміну, як-то безсоння, слабкість, низька працездатність.

Метод *biofeedback* застосовують також які профілактику у здорових осіб, тому що він сприяє вирішенню багатьох проблем. Зокрема експериментально встановлено такі ефекти від впровадження методу [26]:

- підтримка високої працездатності;
- покращення розумової та психічної діяльності;
- усунення прояву втоми та перевтоми;
- усунення напруженості, тривоги і занепокоєння;
- попередження розвитку стресу, невротичних і психосоматичних розладів;
- підготовка до роботи з високим рівнем нервово-психічної напруги.

Висновки.

Професійний стрес є фактором, який суттєво впливає на функційну надійність залізничних операторів, а рівень стресостійкості є зниженим у майже 30 % персоналу. Насамперед це спричиняє негативну дію на професійне здоров'я та професійне довголіття працівників. Нівелювати згубні наслідки від нього можна лише за допомогою чіткої спланованої системи, яка включає засоби індивідуального контролю, підтримки фізичного та психічного стану. Окрім застосування виключно психологічних впливів на

самопочуття, таких як метод зворотного біологічного зв'язку та інших, слід рекомендувати активацію роботи реабілітаційних центрів, кімнат психологічного розвантаження локомотивних бригад у тих виробничих підрозділах, де вони наявні.

Список використаних джерел

1. Brusentsov O. V. Problems of assessing the basic part of the functional reliability level of human operators. *Вісник Харківського національного автомобільно-дорожнього університету*. URL: <https://www.europub.co.uk/articles/problems-of-assessing-the-basic-part-of-the-functional-reliability-level-of-human-operators-A-115636>.
2. Human factors and their influence on safety performance. URL: <https://keneduction.in/human-factors-and-their-influence-on-safety-performance/#:~:text=Human%20Factors%20are%20any%20characteristics,could%20lead%20to%20an%20accident>.
3. U.S. workers are among the most stressed in the world, new Gallup report finds. URL: <https://www.cnn.com/2021/06/15/gallup-us-workers-are-among-the-most-stressed-in-the-world.html>.
4. Понад 70 % населення України живе у стресі. Ось сім принципів резильєнтності, які допоможуть бізнесу зберегти команду. URL: <https://forbes.ua/leadership/ponad-70-naseleennya-ukraini-zhive-u-stresi-yak-tse-vplivae-na-ikh-pratsezdarnist-ta-yak-printsipi-rezilyentnosti-mozhut-dopomogti-zберегти-komandu-28042023-13371>.
5. Брусенцов В. Г. Ергономічні основи контролю працездатності залізничних операторів як засобу підвищення надійності їх професійної діяльності : дис. ... д-ра техн. наук : 05.01.04. Харків, 2013. 359 с. URL: <https://uacademic.info/ua/document/0514U000036>.
6. Яка середня тривалість життя в Україні: що говорить статистика. Факти. URL: <https://fakty.com.ua/ua/ukraine/20240612-yaka-serednya-tryvalist-zhyttya-v-ukrayini-shho-govoryt-statystyka/>.
7. ISO 45001. Occupational health and safety management systems. Requirements for application. URL: <https://www.iso.org/standard/63787.html>.
8. Occupational health: Stress at the workplace. WHO, Regional websites. URL: <https://www.who.int/news-room/questions-and-answers/item/occupational-health-stress-at-the-workplace>.
9. McCarty R. Chapter 2 - The Alarm Phase and the General Adaptation Syndrome: Two Aspects of Selye's Inconsistent Legacy. Stress: Concepts, Cognition, Emotion, and Behavior. 2016. Vol. 1. P. 13-19. URL: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-800951-2.00002-9>.
10. Berry C., Valeix S., Niven J.E., Chapman L., Roberts P. E., Hazell C. M. Hanging in the balance: Conceptualising doctoral researcher mental health as a dynamic balance across key tensions characterising the PhD experience International Journal of Educational Research. 2020. Vol. 102. URL: <https://doi.org/10.1016/j.ijer.2020.101575>.
11. Techniques in the Behavioral and Neural Sciences. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0921070905800057>.
12. Сельє Г. Стрес без дистреса. *Журнал неврології ім. Б. М. Маньковського*. 2016. Т. 4, № 1. С. 78-89. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/jorn_2016_1_13.
13. Human factors and their influence on safety performance. URL: <https://keneduction.in/human-factors-and-their-influence-on-safety-performance/#:~:text=Human%20Factors%20are%20any%20characteristics,could%20lead%20to%20an%20accident>.
14. Work-related stress. Better Health Cannel. URL: <https://www.betterhealth.vic.gov.au/health/healthyliving/work-related-stress>.
15. Sakai R. R., Tamashiro K. L. K. Chapter 1.6 - Social hierarchy and stress. *Techniques in the Behavioral and Neural Sciences*. 2005. Vol. 15, Part 2. P. 113-132. URL: [https://doi.org/10.1016/S0921-0709\(05\)80052-5](https://doi.org/10.1016/S0921-0709(05)80052-5).
16. Chronic Stress Related to Cancer Incidence, including the Role of Metabolic Syndrome Components. URL: <https://www.mdpi.com/2072-6694/16/11/2044>.
17. What is Public Health? CDC Foundation. URL: <https://www.cdcfoundation.org/what-public-health#:~:text=Public%20health%20is%20the%20science,and%20responding%20to%20infectious%20diseases>.
18. Brusentsov V., Puzyr V., Datsun Y., Brusentsov O. The Effect of the Human Personality of a Locomotive Driver on the Professional Integrity Level. *Proceedings of the 26th International Scientific Conference Transport Means 2022* Part I. October 05-07, 2022. Kaunas, Lithuania. P. 186-189. URL: <https://www.proceedings.com/content/066/066492webtoc.pdf>.
19. Бубало Н. М., Балан Г. М. Біологічний вік — інтегральний показник стану здоров'я працівників сільського господарства, які перенесли гострі та хронічні інтоксикації пестицидами. *Український журнал сучасних проблем токсикології*. 2017. № 3 (79). С. 64-72. URL: <http://protox.medved.kiev.ua/index.php/ua/categories/clinical-toxicology/item/535-biological-age-is-an>

integral-parameter-of-the-health-status-of-agricultural-workers-who-have-suffered-acute-and-chronic-pesticide-intoxication.

20. Employee Development: Why Investing in Staff Boosts Success by Green Business Benchmark. 2022.

URL: <https://www.greenbusinessbenchmark.com/archive/employee-development-why-it-matters>.

21. Anand P., Hunter G., Carter I., Dowding K., Guala F. Measurement of human capabilities. *Open Discussion Papers in Economics*. 2007. N. 53

URL: <https://www.econstor.eu/bitstream/10419/65703/1/529903075.pdf>.

22. Решетюк А. Л. Визначення функціонального віку та темпів старіння: метод. рекомендації. Київ: Видавничий центр ІГ АМНУ, 1996. 9 с.

23. Prehler M., Kupfer J., Brähler E. The Giessen Symptom Questionnaire for children and adolescents [Article in German]. URL: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/1494626/>.

24. World Health Organization. URL: https://www.who.int/health-topics/physical-activity#tab=tab_1.

25. Physical activity recommendations for different age groups. URL: <https://www.airc.it/healthy-life-with-airc/en/staying-healthy-through-exercise/physical-activity-recommendations-for-all-age-groups?nl=1>.

26. LeWine H. E. Biofeedback. Harvard Health Publishing. 2023. URL: https://www.health.harvard.edu/a_to_z/biofeedback-a-to-z.

V. Brusentsov, V. Puzyr, Ye. Hryhorieva, B. Harmash, Ya. Serikov, I. Kramchanin

The impact of occupational stress on the level of functional reliability of transport operators

Abstract. The problem of human operator reliability is relevant for many industries. Although today «unmanned» control systems that do not include humans are widely implemented, it is clearly known that a well-trained operator has a number of strong qualities that artificial intelligence does not have. Therefore, the reliability of a control system with a human operator is higher than that of a system without a human operator, even with fourfold redundancy. It is also necessary to take into account the constant increase in the cost of operator error, which is clearly confirmed by examples of current man-made accidents. The problem of human operator reliability is especially relevant due to the fact that the activities of a number of operator professions are characterized by not just harmful, but extreme working conditions that can not only cause a decrease in the worker's reliability, but also directly have a harmful and dangerous effect on humans. This

situation determines a close connection between the problems of reliability and labor safety. Regulatory requirements for labor protection management systems, which primarily include the international standard ISO 45001, directly indicate that the organization is responsible for the health and safety of its employees and persons affected in one way or another by the organization's activities. It should be noted that managerial responsibility is not a recommendation, but a requirement, and ISO 45001 applies to both the support and protection of the physical and mental health of employees. There is always a potentially dangerous impact of professional stress on the professional health of transport operators. The biological expediency of stress is based on the energy supply of activity, mobilization of resources. Due to the ambiguity of the interpretation of the concept of «stress» and the excessive burden of its various concepts, experts believe it possible to replace the concept of «stress» with the concept of «mental tension». Depending on the nature of the impact on activity, two types of such tension are distinguished - tension and stress. Tension is a state that has a positive, mobilizing effect on activity. Accordingly, stress is a state characterized by a decrease in the stability of mental and motor functions, up to the collapse of activity. As a result of professional stress, there is a negative impact on the professional health of the employee. This is due to the fact that the body's response to stress factors is the production of a «stress hormone», most often cortisol. As stress passes, the level of this hormone should gradually decrease. In conditions where stress becomes frequent or chronic, the level of the stress hormone remains constantly elevated. Another consequence of the negative impact of professional stress on the worker's body should be considered accelerated wear of the body, which manifests itself in biological age exceeding the metric age. Professional stress is a factor that has a significant impact on the functional reliability of transport operators. And first of all, such negative impacts affect the professional health and professional longevity of workers. Its destructive impact can be neutralized only with the help of a clearly planned system, including means of individual control, means of maintaining physical and mental condition.

Keywords: professional stress, level of professional reliability, level of physical condition, human factor, labor protection, safety of the transport process.

Брусенцов Віталій Гаврилович, доктор технічних наук, професор кафедри охорони праці та навколишнього середовища, Український державний університет залізничного транспорту. ORCID iD:0000-0002-7003-9889. Тел.: 0662955229. E-mail: brusencov.vitaly@gmail.com.

Пузир Володимир Григорович, доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри експлуатації та ремонту рухомого складу, Український державний університет залізничного транспорту. ORCID iD:0000-0001-6096-9049. Тел.: 0504016191. E-mail-puzyr@kart.edu.ua.

Григор'єва Євгенія Сергіївна, кандидат технічних наук, старший викладач кафедри охорони праці та навколишнього середовища, Український державний університет залізничного транспорту. ORCID iD: 0000-0002-9525-7399. Тел.: 0504013391. E-mail: biletska@kart.edu.ua.

Гармаш Богдан Костянтинович, кандидат технічних наук, доцент кафедри охорони праці та навколишнього середовища, Український державний університет залізничного транспорту. ORCID iD: 0000-0003-2115-1994. Тел.: 0503431963. E-mail: garmash@kart.edu.ua.

Серіков Яків Олександрович, кандидат технічних наук, доцент кафедри охорони праці та безпеки життєдіяльності, Харківський національний університет міського господарства імені О. М. Бекетова. ORCID iD: 0000-0002-3463-2079. Тел.: 0509088828.

E-mail: s0509088828@gmail.com.

Крамчанін Ірина Геннадіївна, психолог ВП «Локомотивне депо Ковель» АТ «Укрзалізниця», магістрант, Волинський національний університет імені Лесі Українки. ORCID iD: 0009-0004-2004-8172. Тел.: 09886128273.

E-mail: irinakhiit@gmail.com.

Brusentsov Vitaliy Gavrylovych Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of "Occupational and Environmental Protection", Ukrainian State University of Railway Transport ORCID iD:0000-0002-7003-9889. Contact tel. – 0662955229,

E-mail- brusencov.vitaly@gmail.com

Puzyr Volodymyr Hryhorovych Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department of Operation and Repair of Rolling Stock, Ukrainian State University of Railway Transport

ORCID iD:0000-0001-6096-9049. Contact tel. – 0504016191,

E-mail- puzyr@kart.edu.ua

Grigorieva Yevheniya Serhiivna Candidate of Technical Sciences, Senior Lecturer of the Department of "Occupational and Environmental Safety", Ukrainian State University of Railway Transport

ORCID iD: 0000-0002-9525-7399 Contact tel. – 0504013391,

E-mail: biletska@kart.edu.ua

Garmash Bohdan Kostyantynovich Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of "Occupational and Environmental Safety", Ukrainian State University of Railway Transport

ORCID iD: 0000-0003-2115-1994 Contact tel. – 0503431963

E-mail: garmash@kart.edu.ua

Serikov Yakiv Oleksandrovykh Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Labor Protection and Life Safety, Kharkiv National University of Urban Economy named after O. M. Beketov, 61002, Ukraine, Kharkiv, Chornoglazivska St., 17

ORCID iD: 0000-0002-3463-2079. Contact tel. – 0509088828,

E-mail – s0509088828@gmail.com

Kramchanin Iryna Gennadiivna, Psychologist of the Private Enterprise “Lokomotive Depot Kovel” JSC “Ukrzaliznytsia”, Master’s student of the Lesya Ukrainka Volyn National University

ORCID iD: 0009-0004-2004-8172. Contact tel. – 09886128273,

E-mail - irinakhiit@gmail.com

УДК 656.2

Д-р техн. наук. ПРОХОРЧЕНКО А.В, Асп. ХАРЧЕНКО Д.Р.,
доктори філософії КИМАН А.М., КРАВЧЕНКО М.А.
ЖУКОВИЦЬКИЙ І.В., д.т.н, професор,

Дослідження правил пріоритетності руху поїздопотоків у залізничних системах

Анотація. У статті досліджено правила пріоритетності руху поїздопотоків у різних залізничних системах світу для виявлення закономірностей, проблем і дієвих практик у встановленні пріоритетів для удосконалення чи розроблення нових правил пріоритетності, які підвищать ефективність роботи залізничної системи України. Проведено класифікацію критеріїв пріоритизації та проаналізовано законодавчу базу. На основі порівняльного аналізу вибраних показників залізничних систем світу виявлено значно завищений показник пунктуальності (рівня виконання графіка руху) пасажирських поїздів на залізниці України. На основі розрахунку дендрограми ієрархічної кластеризації чисельно доведена належність залізниці України до переважно вантажних залізниць із незначним пасажирським рухом. Виявлено, що сучасна перевага пасажирського руху викривляє властивості системи.

Ключові слова: залізнична система, пропускна спроможність, перевантажена інфраструктура, поїздопотік, пріоритизація, пунктуальність.

Вступ.

Для стійкого розвитку залізничної системи важливим є ефективне використання її активів. Однак нерівномірність збільшення попиту в часі і просторі в залізничній системі на будь-який обмежений актив породжує перевантаженість елементів системи. За таких умов важливим є створення механізмів уникнення перевантаження елементів інфраструктури залізничної системи.

Залізнична система України належить до систем зі змішаним рухом пасажирських і вантажних поїздів, експлуатованих на одній інфраструктурі. Практичний досвід роботи національного монопольного перевізника АТ «Укрзалізниця» (АТ УЗ) свідчить про існування значних сплесків попиту як у пасажирських, так і вантажних перевезеннях. Виникнення таких ситуацій призводить до створення конфліктів за наявних обмежених активів, зокрема залізничної інфраструктури. АТ УЗ є вертикально-інтегрованою, де всі рішення з розподілу пасажирських поїздопотоків у залізничній мережі ухвалюють на основі нормативних правил, а у випадку конфліктів у графіку руху поїздів (ГРП) між вантажними поїздами правила є непрозорими та не забезпечують недискримінаційний доступ. Це значний недолік у системі управління рухом поїздів на залізничній мережі, що призводить до неефективного розподілу пропускної спроможності в умовах дефіциту пропускної спроможності інфраструктури.

Як наслідок, виникають збільшення кількості та тривалості затримок поїздів, швидше вичерпується наявна пропускна спроможність на перевантажених дільницях, а отже, збільшення собівартості залізничних послуг із перевезень.

У зв'язку з цим виникає необхідність у розробленні дієвих правил пріоритетності руху різного виду поїздопотоків, що дасть змогу уникати перевантаження залізничної інфраструктури. За таких умов постає завдання дослідження підходів для побудови правил пріоритетності руху в різних залізничних системах країн світу для пошуку ефективних критеріїв пріоритизації поїздопотоків. Отже, вирішення завдання дослідження правил пріоритизації поїздопотоків є актуальним.

Аналіз останніх досліджень і публікацій.

Теоретичних і практичних досліджень із вирішення завдання визначення критеріїв для побудови ефективних правил пріоритетності руху поїздопотоків є досить багато [1]-5]. Необхідно розділяти дослідження для різних видів залізничних систем. Одні підходи стосуються залізничних систем із вертикальним розділенням, зокрема залізниць-країн Європейського Союзу (ЄС). Наприклад, робота [2] присвячена огляду дерегульованих залізничних ринків країн-учасниць ЄС, а також методів розподілу пропускної спроможності на них, розвитку залізничного ринку в ЄС, регулюючого законодавства, а також організації розподілу наявної пропускної спроможності в умовах конфлікту. Дослідження [1] зосереджено на різних метода

х розподілу пропускної спроможності, авторами досліджено переваги та недоліки кожного методу. Асоціацією операторів європейської залізничної інфраструктури (англ. RailNetEurope, RNE) у 2023 році був опублікований звіт щодо правил пріоритетності на залізницях країн-учасниць ЄС [5]. Звіт присвячено практичному розгляду сучасних підходів з визначення правил пріоритетності на кожній залізниці у ЄС, а також аналізу правового регулювання під час встановлення критеріїв пріоритетності. Однак вищенаведені роботи більше присвячені загальному аналізу конфліктів під час розподілу пропускної спроможності залізничної інфраструктури до затвердження зведеного графіка руху і майже не досліджують питання вирішення конфліктів в умовах перевантаження залізничної інфраструктури. У роботі [3] авторами розглянуто правове регулювання процедури розподілу пропускної спроможності. Зокрема авторами проаналізовано вплив директив ЄС 91/440/EU і 2012/34/EU на функціонування залізничного ринку за моделлю відкритого доступу. Зроблено висновок, що сучасні механізми розподілу пропускної спроможності в умовах перевантаженості залізничної інфраструктури не забезпечують ухвалення оптимальних та ефективних рішень під час управління рухом на дільниці з перевантаженістю. Як альтернативу чинним правилам пріоритетності автори пропонують використовувати децентралізований механізм на основі аукціонів для розподілу пропускної спроможності. Дослідження [4] розвиває питання ефективності від впровадження децентралізованого розподілу пропускної спроможності в умовах перевантаженості. Авторами промодельовано процедуру розподілу пропускної спроможності за допомогою різних типів аукціонів. За результатами дослідження було зроблено висновок, що використання аукціонів для розподілу пропускної спроможності, хоч і має певні недоліки, однак метод забезпечує справедливий розподіл пропускної спроможності в умовах відкритого ринку залізничних перевезень.

Існують дослідження, присвячені вирішенню проблеми розподілу пропускної спроможності в умовах дефіциту інфраструктури на основі використання критеріїв пріоритетності. Зокрема, у роботі [6] для вирішення проблеми планування поїздів (англ. train scheduling problem, TSP) у контексті функціонування Індійських залізниць, де існує неоднорідність руху поїздопотоків на дільниці, авторами запропоновано використовувати алгоритм оптимізації на основі мурашиних колоній (англ. Ant Colony Optimization, ACO). Для функціонування моделі на основі ACO були

використані критерії пріоритетності, які відображують тип поїзда, швидкість руху, загальний час у дорозі та час зупинок на станціях. У дослідженні [7] для визначення пріоритетності з використанням математичної моделі з розподілу напрямків множників на основі пріоритетів (ADMM-P) запропоновано використовувати критерій пріоритетності, який являє собою розрахунок сукупних дуальних витрат (англ. dual costs) для кожної нитки (вантажної та пасажирської), прокладеної у графіку руху.

Для вирішення розподілу пропускної спроможності шляхом пріоритизації поїздопотоків активно використовують математичні моделі на основі нейронних мереж [8, 9], запропоновано застосовувати нейронну мережу з використанням навчання з підкріпленням для побудови графіка руху на двонаправлених залізничних дільницях зі змішаним рухом. Для визначення пріоритетності автори використовують критерії, які відображують швидкість поїзда, його тип, місце відправлення та пункт призначення.

Окремим підходом є дослідження [10, 11], де розглянуто інтегровані залізничні системи. У роботі [10] на основі аналізу показника обігу вантажного вагона було сформовано цільову функцію, за якою визначають пріоритетність відправлення поїздів зі станції. Критеріями пріоритетності, за допомогою якої формується функція, є термін доставлення вантажів, кількість вагонів із простроченим терміном у складі поїзда, відстань прямування поїзда, час на виконання вантажних операцій із вагонами, час на переробку на технічних станціях. Однак запропонована функція має сенс лише під час визначення пріоритетності відправлення вантажних поїздів і не має методик визначення пріоритетності в умовах функціонування різного виду поїздопотоків. Дослідження [11] присвячене проблемі визначення факторів, що впливають на черговість обробки вагонів на технічних станціях в умовах невизначеності. Для вирішення цієї проблеми авторами було запропоновано використання нейромережевої моделі для формування критеріїв пріоритетності для кожного вагона. Запропонована модель використовує такі критерії пріоритетності: рівень затримки в доставленні, залишковий час і величину штрафу, і в подальшому класифікує кожен вагон за чотирма класами пріоритетності (звичайний, середній, високий і винятковий). Однак це дослідження спрямовано лише на збільшення ефективності під час операції з обробки вантажного вагонопотоку. У ньому не врахований механізм розподілу пропускної спроможності під час відправлення сформованого складу на перевантажену дільницю.

Визначення мети та завдання дослідження.

Метою роботи є дослідження правил пріоритетності руху поїздопотоків у різних залізничних системах світу для виявлення закономірностей, проблем і дієвих практик у встановленні пріоритетів, що дають змогу удосконалити чи розробити нові правила пріоритетності, які підвищать ефективність роботи залізничної системи України.

Досягнення поставленої мети здійснено шляхом вирішення таких завдань дослідження:

- складено класифікатор критеріїв пріоритетності руху поїздів, використовуваних на залізницях світу, і проаналізовано законодавчу базу щодо встановлення правил пріоритету;

- проведено порівняльний аналіз вибраних показників залізничних систем світу і класифіковано властивості залізничної системи України між іншими залізницями світу на основі методів ієрархічної кластеризації.

Викладення основного матеріалу.

Механізм управління рухом на перевантажених дільницях має забезпечувати мінімізацію часових та експлуатаційних витрат і дотримання встановленого розкладу руху для кожного поїзда, який знаходиться на дільниці з дефіцитом пропускної спроможності. Механізм має бути реалізований на основі процедури розподілу пропускної спроможності під час побудови щорічного ГРП. Ця процедура передбачає вирішення конфліктів у ГРП щодо проходження перевантаженої дільниці з використанням заздалегідь визначених критеріїв пріоритетності, що встановлено для кожного поїзда, нитка якого закладена у графіку руху [12, 13]. Такі критерії мають бути прозорими та чіткими і забезпечувати недискримінаційну політику щодо визначення порядку проходження через перевантажену дільницю для кожного залізничного перевізника.

Критерії пріоритетності можна класифікувати за трьома основними напрямками: адміністративний, експлуатаційно-економічний і з використанням механізму аукціонів. Характеристика адміністративного напрямку передбачає існування заздалегідь визначених критеріїв пріоритетності з боку оператора інфраструктури (англ. Infrastructure Manage, IM) або національного законодавства. Складовими змінними, використовуваними для формування критеріїв за допомогою адміністративного напрямку, є тип поїзда, різновид перевезень і характеристика вантажу, що перевозять. Критерії пріоритетності, сформовані за допомогою адміністративного напрямку, можуть бути соціально орієнтованими або вантажоорієнтовними. Соціальна орієнтованість

передбачає надання пріоритетності в русі через перевантажену дільницю малопробутковим поїздам, які мають високу суспільну важливість для населення або держави та забезпечують важливий соціальний внесок у її розвиток. Використання соціально орієнтованих критеріїв не забезпечить ухвалення оптимальних рішень, які збільшать ефективність використання перевантаженої дільниці, однак сприятиме підтримці та збільшенню якості соціально важливих перевезень (зокрема пасажирських). Надання пріоритетності соціальним перевезенням є досить розповсюдженим у країнах із відкритим ринком перевезень і розвинутою залізничною мережею.

Альтернативою соціальній орієнтованості з визначення критеріїв пріоритетності є орієнтованість у наданні пріоритетності вантажним поїздам (вантажна орієнтованість). У цьому випадку на дільниці з недостатньою пропускною спроможністю пріоритетність надають вантажному поїздопотоку, що забезпечує збільшення економічної ефективності від функціонування перевантаженої дільниці, однак зменшує якість пасажирських перевезень через необхідність у пропусканні вантажних поїздів із більш низькою середньою швидкістю. На сьогодні на практиці вантажний напрям визначення критеріїв пріоритетності характерний для залізничних систем із горизонтальним поділом залізничних ринків.

Концепція формування критеріїв пріоритетності за допомогою аналізу експлуатаційно-економічних показників передбачає застосування і подальший аналіз статистичних та економічних даних про певний поїзд або ефективність використання перевантаженої дільниці. Пріоритетними в русі є поїзди, які мають найбільший рівень економічної або експлуатаційної ефективності від їх проходження через перевантажену дільницю серед усіх наявних поїздів у графіку руху. Визначення критеріїв пріоритетності за допомогою такої концепції може відбуватися за допомогою математичних моделей за правилами, заснованими на аналізі експлуатаційних даних [13, 14]:

- правило найбільшої затримки. Критерій пріоритетності визначають рівнем часового відхилення поїзда від встановленого розкладом руху. Поїзд із більшим рівнем відхилення від розкладу руху має пріоритет над поїздами, що знаходяться «у графіку» або з меншим часом затримки. Критерії пріоритетності, побудовані з використанням такого правила, забезпечать мінімізацію часу затримки для поїздів, які вже мають відхилення від встановленого розкладу руху, однак сприятиме виникненню нових затримок для поїздів із меншим часом затримки. Це правило доцільно використовувати під час

глобального порушення ГРП для зменшення максимального часу затримки для всіх поїздів;

– правило найкращих витрат (англ. Best Cost Priority Rule (BCPR)). Критерій пріоритетності визначають шляхом обчислення витрат (часових або експлуатаційних) від проходження поїздом перевантаженої дільниці та загальний вплив на рівень витрат для інших поїздів. Перевагу надають поїзду, проходження якого через перевантажену дільницю забезпечує мінімальні витрати для всіх інших поїздів. Використання такого методу є найефективнішим серед інших, однак потребує обчислення кожного можливого рішення на рівні витрат інших для поїздів, що унеможливує його використання під час оперативного втручання;

– правило раннього виходу (англ. Early Finish Priority Rule (EFPR)). У випадку використання цього правила критерій пріоритетності можна визначити двома способами:

1) розрахування загального часу проходження поїзда через перевантажену дільницю. Пріоритет мають ті поїзди, у яких час виходу з перевантаженої дільниці найменший;

2) визначення середньої швидкості поїзда. Перевагу надають поїздам із більшою швидкістю на дільниці.

Використання правила EFPR є схожим із BCPR, однак EFPR концентрується лише на одному поїзді без урахування наявної всієї ситуації на перевантаженій дільниці;

– правило раннього входу (англ. Early Start Priority Rule (ESPR)). Критерій пріоритетності визначають за часом в'їзду поїзда на перевантажену дільницю. Перевагу мають поїзди, у яких час прибуття на перевантажену дільницю раніше. Використання такого підходу дає змогу мінімізувати час простою поїзда в очікуванні відправлення, однак сприятиме виникненню затримок для поїздів, які мають більш пізніший час прибуття.

У випадку, коли неможливо визначити конфліктну ситуацію за допомогою зазначених правил, для їх розподілу можна використовувати додаткові експлуатаційні показники, які відображують рівень якості здійснення перевезень (пунктуальність перевізника) або випадковий вибір визначення порядку проходження дільниць.

Критерії пріоритетності, сформовані на основі аналізу економічних показників, передбачають надання переваги у проходженні перевантаженої дільниці поїздам, які мають найвищу економічну ефективність (або найменші економічні витрати):

– загальний дохід від поїзда – обчислення рівня тарифів і зборів, загальної довжини рейсу, а

також експлуатаційних витрат на **1 ткм** для кожної конфліктної нитки. Пріоритет надають поїзду, який має найбільший сумарний дохід серед усіх поїздів;

– середня вартість простою поїзда в очікуванні відправлення – оцінювання витрат на час простою поїзда в очікуванні відправлення на перевантажену дільницю. Перевагу в русі надають поїзду, який має найбільші сумарні витрати під час очікування відправлення.

Слід зазначити, що для розподілу пропускної спроможності зазначені способи формування критеріїв пріоритетності можна використовувати як диференційовано, так і в поєднанні з іншими критеріями з метою найефективнішого вирішення конфліктів у ГРП під час розподілу пропускної спроможності на перевантажених секторах.

Функціонування процедури розподілу пропускної спроможності, побудованої на концепції використання механізму відкритих торгів (аукціонів), передбачає проведення конкурентної боротьби за організовані нитки графіка серед усіх зацікавлених стейкхолдерів. Реалізація такого процесу відбувається за допомогою критерію пріоритетності, який залежить від економічної цінності заявки (ціни пропозиції) від залізничного перевізника [15]. Вирішення конфліктів за наявну пропускну спроможність на основі відкритих торгів сприяє прозорій і конкурентній боротьбі, що забезпечує збільшення економічної ефективності від функціонування перевантаженої дільниці [16], однак може скорочувати можливості виграшу в аукціонах із боку перевізників із меншим бюджетом.

Для розподілу пропускної спроможності на перевантажених дільницях, що знаходяться на міжнародних коридорах мережі TEN-T, можуть застосовувати критерії пріоритетності, засновані на методології обчислення пріоритетності розподілу попередньо визначеної нитки графіка (англ. Pre-arranged Patch, PaP). За цим методом, показник пріоритетності (K) ґрунтується на обчисленні загальної довжини всіх секцій попередньо визначеної нитки графіка (PaP) і робочих днів на період дії графіка руху [17]. Слід зазначити, що ця концепція може бути використана для визначення пріоритетності як на міжнародних вантажних коридорах, так і в рамках національної залізничної мережі. Класифікація критеріїв пріоритетності наведена на рис. 1.

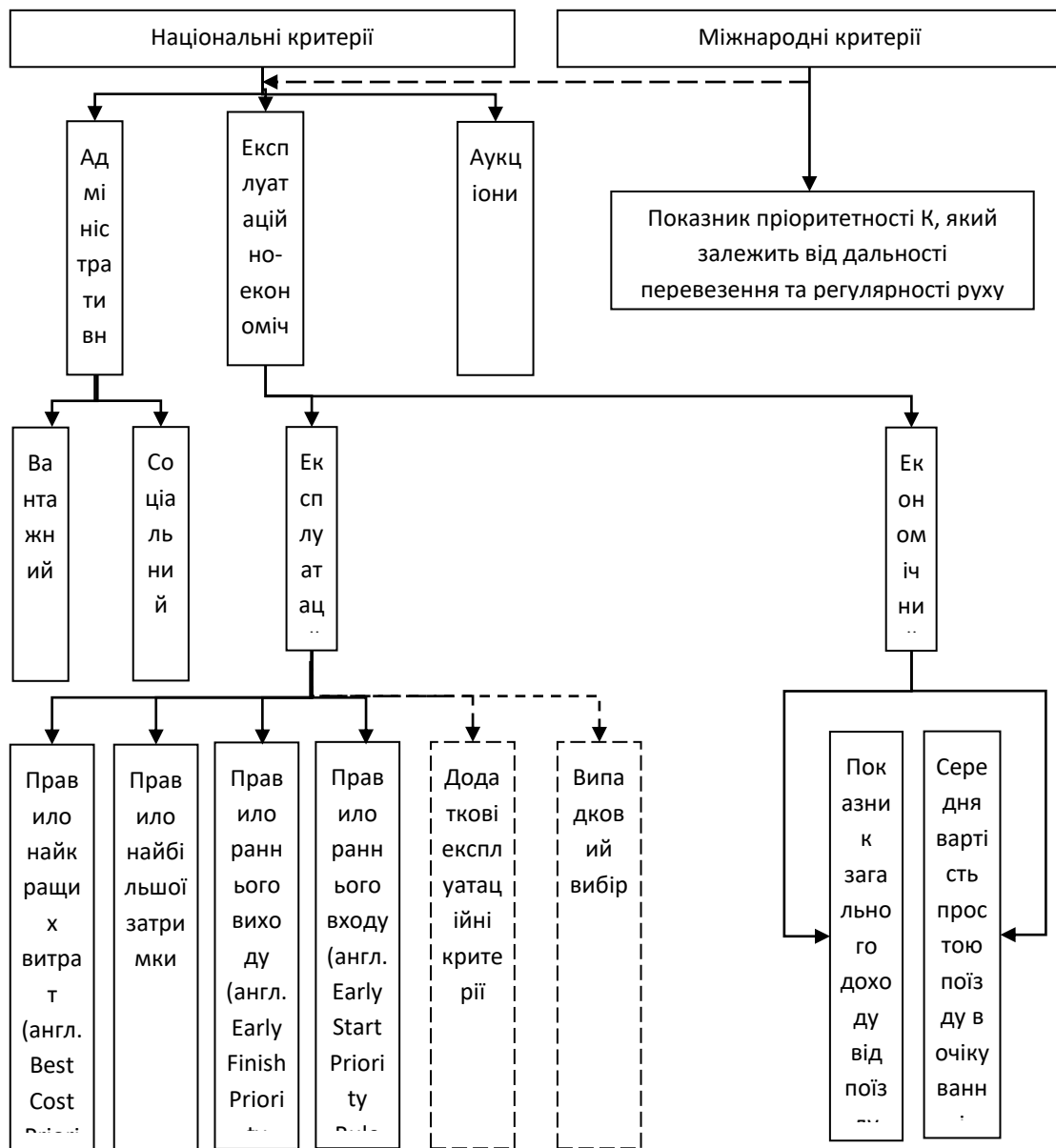


Рис. 1. Схема-класифікатор критеріїв пріоритетності для руху поїздопотоків

Важливою передумовою для успішного функціонування механізму розподілу пропускної спроможності, заснованого на процедурі пріоритизації поїздопотоків за допомогою критеріїв пріоритетності в сегменті перевантажених залізничних секцій, є встановлення основних принципів здійснення перевізного процесу на законодавчому рівні. У межах функціонування залізничних систем за європейською моделлю розподілу (вертикальний розподіл) правове регулювання перевізного процесу на перевантажених секціях здійснюється централізовано згідно з Регламентом ЄС 913/2010 [18] і Директивою 2012/34/ЄС [12], що встановлюють вимоги до операторів інфраструктури в обов'язковому розробленні

правил пріоритетності для перевантажених залізничних дільниць, які функціонують у рамках національної залізничної мережі, а також міжнародних вантажних коридорів. Процедура визначення пріоритетності має ґрунтуватися на основі критеріїв, які враховують рівень суспільної важливості залізничних послуг для населення, а також їхню класифікацію за видом перевезення. Слід зазначити, що розроблені правила пріоритетності мають бути опубліковані в «Положенні про мережу» (англ. Network Statement, NS) кожного національного залізничного перевізника.

На національному рівні країн-учасниць ЄС критерії пріоритетності визначають як централізовано, так і децентралізовано. Централізоване регулювання критеріїв

пріоритетності передбачає їх визначення одноосібно з боку держави або регулюючих органів. Критерії, встановлені з боку органів влади, є обов'язковими з боку всіх національних ІМ, що функціонують на території країни. Використання централізованого підходу у визначенні критеріїв пріоритетності унеможливило встановлення дискримінаційних умов проходження перевантаженого сектору для певних видів або типів поїздопотоків із боку ІМ, однак може не враховувати певні регіональні умови експлуатації перевантажених залізничних дільниць, де необхідно встановлення особливих умов проходження через них. Крім того, централізований підхід потребує складного бюрократичного процесу у випадках необхідності змін до вже існуючих правил пріоритетності. У свою чергу децентралізоване регулювання передбачає самостійне визначення оператором інфраструктури критеріїв пріоритетності на підпорядкованій йому залізничній мережі. Децентралізоване регулювання забезпечує більший рівень «гнучкості» під час прокладання та подальше вирішення конфліктів у ГРП за рахунок можливості самостійно встановлювати критерії пріоритетності з боку ІМ, однак значно збільшує ризики встановлення дискримінаційних критеріїв, що характерно для залізничних систем із недостатнім розвитком залізничних перевезень за моделлю відкритого доступу.

У межах функціонування міжнародних вантажних коридорів (RFC) основні критерії пріоритетності може визначати самостійно (децентралізовано) кожен орган комплексного обслуговування (C-OSS) із подальшим викладенням у спеціальному інформаційному документі про коридор (англ. The Corridor Information Document, CID) [16]. Однак, як показує практика, критерії пріоритетності більшості вантажних коридорів функціонують у рамках національних критеріїв пріоритетності країни, через яку проходить вантажний коридор.

Встановлення критеріїв пріоритетності в залізничних системах за американською моделлю розподілу (горизонтальний розподіл) відбувається централізовано з боку органів державної влади. Встановлені критерії є соціально орієнтованими, однак на практиці через особливості функціонування залізничного ринку за горизонтальним розподілом ринків, що передбачає одноособове управління залізничною інфраструктурою з боку компанії – власника колій, перевагу надають вантажному поїздопотоку свого формування, незалежно від наявності пасажирських поїздів.

У межах функціонування залізничного транспорту України критерії пріоритетності визначені централізовано з боку держави та викладені у Правилах технічної експлуатації

(ПТЕ) [20]. Ці критерії надають пріоритет пасажирським перевезенням, однак у контексті функціонування міжнародних транспортних коридорів, які проходять територією України, правове регулювання критеріїв пріоритетності на сьогодні відсутнє. Також чинною редакцією ПТЕ не визначено порядок проходження вантажного поїздопотоку через перевантажену дільницю. У табл. 1 відображені підхід для встановлення критеріїв пріоритетності за вибраними країнами з розвинутою залізничною мережею.

Таблиця 1

Порівняльний аналіз законодавчої бази залізничних систем щодо встановлення критеріїв пріоритетності та класифікації підходів

Країна (оператор інфраструктури)	Підхід для встановлення критеріїв пріоритетності	Орган регулювання	Регулюючий документ	Різновид підходу
Польща (PKP PLK)	Децентралізований	Оператор інфраструктури	Network Statement [21]	Соціальний
Німеччина (DB Netz)	Децентралізований	Оператор інфраструктури	Network Statement [22]	Соціальний
Франція (SNCF Réseau)	Децентралізований	Оператор інфраструктури	Network Statement [23]	Соціальний
Румунія (CFR)	Централізований	Національне законодавство	Наказ Міністерства транспорту та інфраструктури [24]	Соціальний
США	Централізований	Національне законодавство	Закон про залізничний транспорт [19]	Соціальний (на практиці - вантажний)

Україна (АТ «УЗ»)	Централізований	Національне законодавство	Правила технічної експлуатації залізниць [20]	Соціальний
-------------------------	-----------------	---------------------------	---	------------

переважно вантажних. Ураховуючи вертикальну інтеграцію залізничної системи України, запропоновано розширити аналіз на подібні залізниці, такі як США, Канада, Індія. У межах порівняльного аналізу залізниць США була вибрана приватна вантажна залізниця CSX Transportation, на мережі якої обертаються пасажирські поїзди державної пасажирської компанії Amtrak. У табл. 2 наведені основні експлуатаційні показники залізничних систем.

Для детальнішого вивчення проблеми встановлення пріоритетності поїздопотоків у статті запропоновано проаналізувати основні показники вибраних залізничних систем і порівняти їх із залізничною системою України. Вибрано різні типи залізничних систем із вертикальним розподілом – Польща, Німеччина, Франція, Румунія та Велика Британія. Залізниці цих країн є переважно пасажирськими, тоді як залізничну систему України можна віднести до

Таблиця 2

Експлуатаційні показники залізничних систем за 2019 рік

Показник	Польща (Poland)	Німеччина (Germany)	Франція (France)	Румунія (Romania)	США (USA) CSX/Amtrak	Україна (Ukraine)	Велика Британія (UK)	Індія (India)	Канада (Canada)
Загальна довжина колій, км	19359	39068	28142	10759	32186	19799	15935	63140	46552
Частка пасажирського руху в загальних поїздохілометрах, %	68,65	77,19	86,12	73,59	66,41	25,50	94,38	65,93	19,13
Поїздохілометри пасажирські, млн поїздів	180,2	856	364,7	63,8	64,5	36,2	558,4	769	11,74
Поїздохілометри вантажні, млн поїздів	82,3	253	58,8	22,9	32,63	105,7	33,2	397	49,62
Пасажирообіг, млрд пас. км	22,07	102,90	95,95	5,23	10,99	28,41	66,80	1050,74	1,8
Вантажообіг, млрд ткм	55,91	128,70	33,77	3,76	299,73	181,84	0,02	707,67	455,8
Кількість перевезених пасажирів, млрд пас.	0,34	2,94	1,27	0,07	0,03	0,15	1,74	8,09	0,01
Кількість перевезених вантажів, млрд т	0,23	0,36	0,09	0,06	н/д	0,31	0,07	н/д	0,33
Пунктуальність вантажних поїздів, %	35,0 [25]	57,0 [25]	77 [25]	65 [25]	79 [27]	95,60* [30]	92,60 [30]	н/д [31]	88,40 [33]
Пунктуальність пасажирських поїздів, %	80,5 [25]	77,0 [25]	87,0 [25]	56,0 [25]	75,0 [26]	92,46 [28]	83,92 [29]	70,54 [31]	68 [32]

Примітка. * Процент вантажних поїздів, які прослідували за розкладом, н/д – нема даних.

На першому етапі проведено порівняльний аналіз залежності рівня пунктуальності руху пасажирських поїздів від вантажо- та пасажирообігу. Для наглядності аналізу побудовано діаграму бульбашкового типу (рис. 2). З аналізу діаграми на рис. 2 можна зробити висновок про значне завищення показника пунктуальності пасажирських поїздів (92,46 %) у залізничній системі України порівняно зі схожими залізницями. Залізнична система України з

показником пасажирообігу належить до систем із незначною величиною (28,41 млрд пас. км), але такі залізничні системи, як Франція, Велика Британія, Німеччина, що мають значно більші обсяги пасажирських перевезень, мають показник пунктуальності нижче 90 %. Однак залізнична система України значно перевищує європейські залізничні системи за показником вантажообігу (181,84 млрд ткм). Це досить близько до показників із залізничною системою Німеччини, яка має одну з найгірших пунктуальностей пасажирських поїздів (77,0 %) серед європейських залізниць. Залізнична система Румунії має

аномальні показники і не може бути порівняною. Показники залізничної системи Індії доводять, що в умовах значного вантажного руху пунктуальність пасажирських поїздів менше 80 %. Кластер країн із значним вантажообігом має зсув вліво на діаграмі і лише залізнична система України зміщена вправо. Більш узагальнено можна провести аналіз залежності показника

пунктуальності руху пасажирських поїздів від пунктуальності руху вантажних поїздів і вантажообігу залізничних систем (рис. 3).

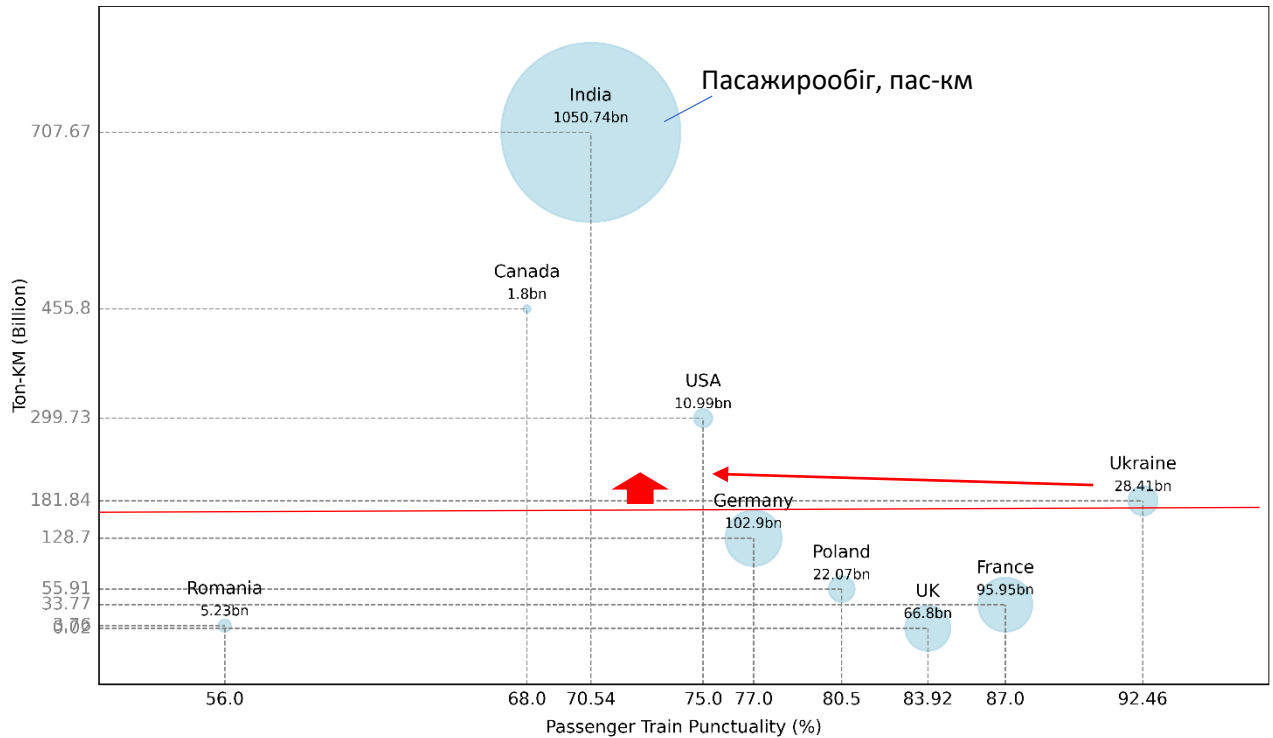


Рис. 2. Діаграма залежності показника пунктуальності руху пасажирських поїздів від вантажообігу та пасажирообігу залізничних систем

пасажирських поїздів, що спричиняє значні збитки

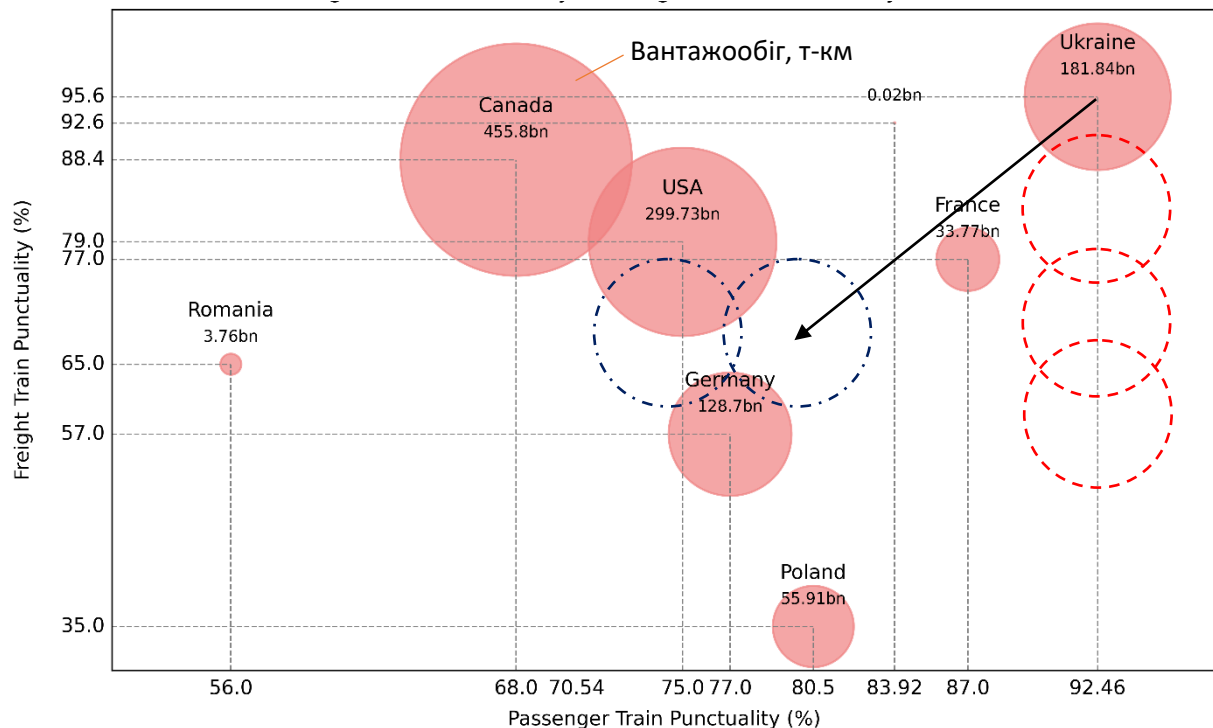


Рис. 3. Діаграма залежності показника пунктуальності руху пасажирських поїздів від пунктуальності руху вантажних поїздів і вантажообігу залізничних систем

Із діаграми на рис. 3 простежують таку залежність: чим більший вантажообіг, тим менший рівень пунктуальності пасажирських поїздів. Пунктуальність вантажних поїздів (95,6 %) була прийнята зі звітності АТ «Укрзалізниця», що й відображено на діаграмі, але, урахуовуючи відправлення вантажних поїздів без дотримання нормативного графіка руху, цей показник досить умовний. Для більш якісного оцінювання практичних умов експлуатаційної роботи АТ «Укрзалізниця» на діаграмі відображено червоними пунктирними колами можливі позиції України за показником рівня виконання графіка руху вантажних поїздів. Навіть зміна позиції за пунктуальністю вантажного руху чітко дає зрозуміти, що залізнична система України порушує залежність пунктуальності пасажирського руху від пунктуальності вантажних поїздів. Кола зі штрих-пунктирним синім контуром на діаграмі рис. 3 показують позиції залізничної системи України за умови дотримання описаної вище залежності. Такий аналіз доводить, що безумовний пріоритет пасажирського руху над вантажним призводить до «викривлених» властивостей залізничної системи України. Відсутність балансу між пріоритетністю руху вантажних і пасажирських поїздів призводить до занадто високого рівня виконання графіка руху

відстань (англ. Euclidean Distance) за вибраними показниками для кожної країни.

Формула розрахунку відстані для двох точок (залізниць країн) $A = (x_1, x_2, x_3, \dots, x_n)$ та $B = (y_1, y_2, y_3, \dots, y_n)$ у n -вимірному просторі має вигляд [26]

$$d = \sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - y_i)^2},$$

де x_i – значення i -го показника (ознаки) для залізниці країни (точки) A ;

y_i – значення i -го показника (ознаки) для залізниці країни (точки) B .

Обчислені відстані між усіма парами країн використовують для вимірювання схожості між країнами за вибраними показниками.

На другому етапі, після об'єднання двох країн в один кластер, обчислюють відстань між цим кластером та іншими країнами або кластерами за формулою Уорда для збільшення дисперсії [26]:

$$\Delta = \sum_{i \in C} \|x_i - \mu_C\|^2,$$

де C – кластер;

μ_C – центр ваги кластера (середнє значення координат);

$\|x_i - \mu_C\|^2$ – відстань точки до центра кластера. Залізничні країни або кластери об'єднують,

якщо це призводить до найменшого збільшення суми квадратів відстаней.

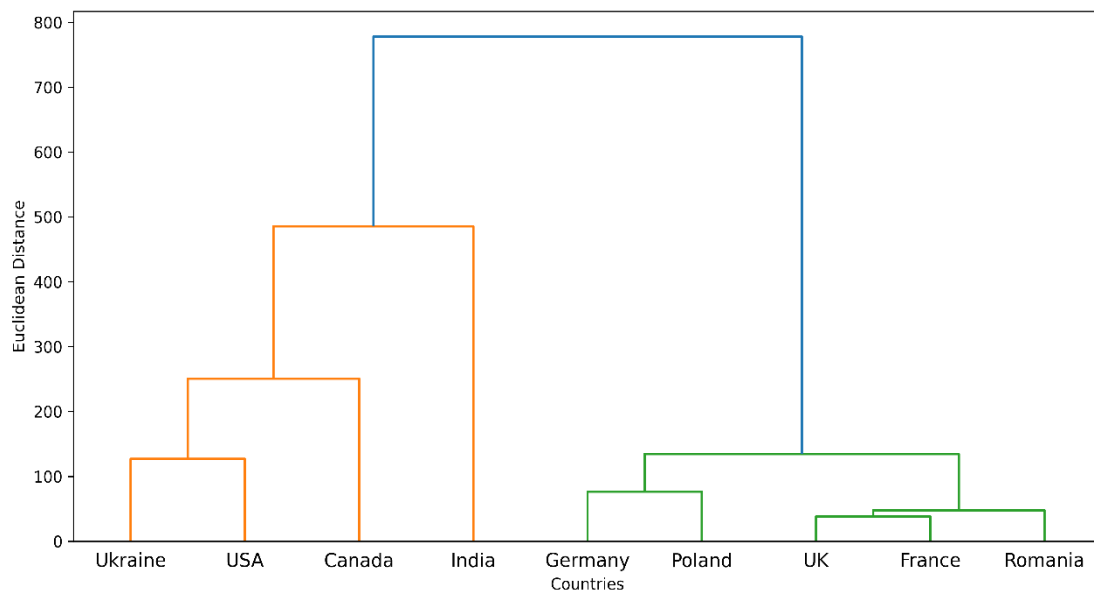


Рис. 4. Дендрограма ієрархічної кластеризації за показниками загальної довжини колій, частки пасажирських поїздохілометрів від загальних, вантажообігу, пунктуальності пасажирських поїздів для залізничних систем країн, що досліджують

Відповідно до дендрограми на рис. 4 за ієрархічною кластеризацією залізнична система України потрапляє в окремий кластер залізниць, що мають високий вантажообіг. Цей показник разом із часткою пасажирського руху від загального найбільше впливає на формування окремого кластера. Країни з помірним вантажообігом і відносно високою часткою пасажирських перевезень утворюють другий великий кластер, де Німеччина з Республікою Польща поряд, тоді як Франція подібна до Великої Британії, і вони поряд із залізничною системою Румунії. За умови додавання таких показників, як розмір мережі та вантажообіг із часткою пасажирських поїздохілометрів від загальних, залізнична система України потрапляє до кластера переважно вантажних залізничних систем із вертикальною інтеграцією. Це доводить, що показник пунктуальності пасажирських поїздів для залізничної системи України є досить аномальним. Позиція України – поряд із залізничними системами, що мають менші значення пунктуальності пасажирського руху.

Висновки. Результати дослідження правил пріоритетності руху поїздопотоків у залізничних системах світу дали змогу виявити негативний вплив недосконалої системи пріоритизації руху поїздопотоків у залізничній системі України на ефективність її функціонування. За складеним класифікатором критеріїв пріоритетності, використовуваних на

залізницях світу, доведено, що в залізничній системі України застосовують соціально орієнтований критерій. Це передбачає надання пріоритетності в русі через перевантажену дільницю пасажирським поїздам, які мають високу суспільну важливість для населення або держави, але є збитковими. У той же час аналіз законодавчої бази щодо встановлення пріоритетів руху поїздів показав, що в Україні відсутня єдина та прозора нормативна документація, що встановлює правила визначення пріоритетності руху поїздів. Пріоритет надають пасажирським поїздам, коли відсутні критерії пріоритизації вантажних поїздів. На основі порівняльного аналізу вибраних показників залізничних систем світу виявлено значно завищений показник пунктуальності (рівня виконання графіка руху) пасажирських поїздів. На основі розрахунку дендрограми ієрархічної кластеризації за методом Уорда чисельно доведено належність залізничної системи України до переважно вантажних залізниць із незначним пасажирським рухом. Виявлено, що переважання пасажирського руху викривляє властивості системи. Висунуто гіпотезу, що відсутність балансу між пріоритетністю руху вантажних і пасажирських поїздів у залізничній системі України призводить до занадто високого рівня виконання графіка руху пасажирських поїздів, що спричиняє значні збитки для вантажних перевезень. Це може пояснювати проблему щорічного потрапляння залізничної системи України в піковий період навантаження у стан

перевантаження, де виникають значні системні затори вантажних поїздів. Отримані результати і висновки дають змогу в подальшому чисельно вивчити вплив пасажирського руху на вантажний і перейти до формування вимог до правил пріоритетності, які можна використовувати під час проведення анбандлінгу в АТ «Укрзалізниця».

Список використаних джерел

1. Ait Ali A., Eliasson J. European railway deregulation: an overview of market organization and capacity allocation. *Transportmetrica A: Transport Science*. 2021. P. 1–25. URL: <https://doi.org/10.1080/23249935.2021.1885521> (дата звернення: 10.12.2024).
2. Gibson S. Allocation of capacity in the rail industry. *Utilities Policy*. 2003. Т. 11, № 1. P. 39–42. URL: [https://doi.org/10.1016/s0957-1787\(02\)00055-3](https://doi.org/10.1016/s0957-1787(02)00055-3) (дата звернення: 10.12.2024).
3. Boskovic B., Stojadinovic N. Train path allocation on congested railway infrastructure – Is a service priority criteria limiting development of competition? *International scientific-expert conference on railways «RAILCON'16»: матеріали Міжнар. наук. конф., 13–16 жовт. 2016 р.* URL: https://www.researchgate.net/publication/309187245_Train_path_allocation_on_congested_railway_infrastructure_-_Is_a_service_priority_criteria_limiting_development_of_competition (дата звернення: 10.12.2024).
4. Train path congestion management: Using hybrid auctions for decentralized railway capacity allocation / N. Stojadinović та ін. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*. 2019. Т. 129. P. 123–139. URL: <https://doi.org/10.1016/j.tra.2019.08.013> (дата звернення: 10.12.2024).
5. RailNetEurope. Overview of priority rules in operation. *RailNetEurope*. URL: https://rne.eu/wp-content/uploads/RNE_OverviewOfthePriorityRulesInOperation.pdf (дата звернення: 10.12.2024).
6. Mishra A., Kumar N., Kharb S. Priority Based Train Scheduling Method Using ACO in Indian Railway Perspective. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2020. Т. 998. P. 012016. URL: <https://doi.org/10.1088/1757-899x/998/1/012016> (дата звернення: 10.12.2024).
7. Gao R., Niu H. A priority-based ADMM approach for flexible train scheduling problems. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*. 2021. Т. 123. P. 102960. URL: <https://doi.org/10.1016/j.trc.2020.102960> (дата звернення: 10.12.2024).
8. Single-track railway scheduling with a novel gridworld model and scalable deep reinforcement learning / F. Yang та ін. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*. 2023. Т. 154. P. 104237. URL: <https://doi.org/10.1016/j.trc.2023.104237> (дата звернення: 10.12.2024).
9. Khadilkar H. A Scalable Reinforcement Learning Algorithm for Scheduling Railway Lines. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*. 2019. Т. 20, № 2. P. 727–736. URL: <https://doi.org/10.1109/tits.2018.2829165> (дата звернення: 10.12.2024).
10. Лаврухін О. В. Визначення цільової функції пріоритетного відправлення вантажних поїздів зі станції. *Східно-Європейський журнал передових технологій*. 2011. Т. 2, № 50. С. 20–22. URL: <http://lib.kart.edu.ua/bitstream/123456789/1420/1/1/Lavrukhin.pdf> (дата звернення: 10.12.2024).
11. Пархоменко Л. О., Прохоров В. М., Калашнікова Т. Ю., Овсянніков Д. О. Формування моделі управління пріоритетністю обробки вагонів на технічних станціях в умовах невизначеності. *Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті*. 2024. № 1. С. 44–54. URL: <http://lib.kart.edu.ua/bitstream/123456789/21410/1/Parkhomenko.pdf>.
12. Establishing a single European railway area : Директива ЄС від 12.12.2012 р. № 2012/34/EU. URL: <https://eur-lex.europa.eu/eli/dir/2012/34/oj> (дата звернення: 10.12.2024).
13. Abid M. M., Khan M. B. Scalable Optimization of Railway Schedule Using Branch and Bound Technique with Priority Rules. *Fourth International Conference on Transportation Engineering: матеріали Міжнар. наук. конф., жовт. 2013 р.* URL: <http://dx.doi.org/10.1061/9780784413159.459> (дата звернення: 10.12.2024).
14. Abid M. M., Khan M. B., Iqbal M. Timetable optimization for single line railway. *European Transport/Trasporti Europei*. 2015. № 58. P. 1–17. URL: https://www.researchgate.net/publication/283594728_Timetable_optimization_for_single_line_railway (дата звернення 10.12.2024).
15. Wilson W. W., Dahl B. L. Bidding on railcars for grain: a strategic analysis. *Agricultural Economics Report*. 1997. № 376. URL: https://www.researchgate.net/publication/23514306_BIDDING_ON_RAILCARS_FOR_GRAIN_A_STRATEGIC_ANALYSIS (дата звернення 10.12.2024).
16. Shymanska O. Auction theory and its practical application. *Herald of Economics*. 2021. № 1(99). P. 143. URL: <https://doi.org/10.35774/visnyk2021.01.143> (дата звернення: 17.12.2024).
17. Прохорченко А. В. Залізничні системи з вертикальним розділенням. Європейська модель. Дніпро: Ліра, 2022. 316 С.

18. Concerning a European rail network for competitive freight. Регламент ЄС від 20.10.2010 р. № 913/2010. URL: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=celex%3A32010R0913> (дата звернення: 10.12.2024).
19. 49 USC 24308: Use of facilities and providing services to Amtrak. *OLRC Home*. URL: <https://uscode.house.gov/view.xhtml?req=granuleid:USC-2000-title49-section24308&num=0&edition=2000#:~:text=%24308, on%20which%20the%20parties%20agree> (дата звернення: 10.12.2024).
20. Про затвердження Правил технічної експлуатації залізниць України: Наказ М-ва трансп. України від 20.12.1996 р. № 411 : станом на 1 січ. 2004 р. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0050-97#Text> (дата звернення: 10.12.2024).
21. Network Statement 2023/2024 - PKP Polskie Linie Kolejowe S.A. *PKP Polskie Linie Kolejowe* S.A. URL: <https://en.plk-sa.pl/for-customers-and-partners/the-rules-for-allocating-train-paths/network-statement-2023/2024> (дата звернення: 10.12.2024).
22. Network Statement 2025. *DB InfraGO: Eisenbahninfrastruktur der Zukunft in Deutschland*. URL: https://www.dbinfrago.com/web-en/rail-network/network_statement/Network-Statement-2025-12612778 (дата звернення: 10.12.2024).
23. Network Statement of the National Rail Network - Timetable 2025. *SNCF Réseau*. URL: <https://www.sncf-reseau.com/fr/drt/network-statement-national-rail-network-timetable-2025> (дата звернення: 10.12.2024).
24. ORDIN 1165 10/07/2012 - Portal Legislativ. *Pagina de start - Portal Legislativ*. URL: <https://legislatie.just.ro/Public/DetaliuDocument/139591> (дата звернення: 10.12.2024).
25. European Commission adopts 8th report on development of the rail market. *Mobility and Transport*. URL: https://transport.ec.europa.eu/news-events/news/european-commission-adopts-8th-report-development-rail-market-2023-09-27_en (дата звернення: 10.12.2024).
26. Amtrak On-Time Performance Trends and Hours of Delay by Cause. *Bureau of Transportation Statistics*. URL: <https://www.bts.gov/content/amtrak-time-performance-trends-and-hours-delay-cause> (дата звернення: 10.12.2024).
27. CSX Transportation. Annual report. 2019. 138 p. URL: <https://s2.q4cdn.com/859568992/files/annual/2019-CSX-Annual-Report.pdf> (дата звернення: 10.12.2024).
28. АТ «Укрзалізниця». Річний інтегрований звіт за 2019 рік. Київ, 2019. 120 с.
29. Passenger rail performance. *ORR Data Portal*. URL: <https://dataportal.orr.gov.uk/statistics/performance/passenger-rail-performance/> (дата звернення: 10.12.2024).
30. Freight rail usage and performance. *ORR Data Portal*. URL: <https://dataportal.orr.gov.uk/statistics/usage/freight-rail-usage-and-performance> (дата звернення: 10.12.2024).
31. Government Of India Rail Mantralaya Ministry Of Railways (Railway Board). Annual report & Accounts of Indian Railways. 2020. 179 p. URL: https://assets-global.website-files.com/5d70c9269b8d7bd25d8b1696/6406eae7a095b56be697ec50_RFG3GqUFCX0k3kXkI5T-95hc-Wdfj1V6hsj2MwMiwY.pdf (дата звернення: 10.12.2024).
32. Via Rail Canada. Annual report. 2019. 142 p. URL: https://media.viarail.ca/sites/default/files/publications/2019%20VIA%20RAIL%20AR_ENGLISH.pdf (дата звернення: 10.12.2024).
33. CN's marching orders to the tune of a new operating model seem simple, but perfecting the steps isn't. *Progressive railroading*. URL: <https://www.progressiverailroading.com/canadian-national/article/CNs-marching-orders-to-the-tune-of-a-new-operating-model-seem-simple-but-perfecting-the-steps-isnt--70396> (дата звернення: 10.12.2024).
34. Дослідження стабільності руху поїздопотоків на вантажонапружених залізничних полігонах / М. А. Кравченко, Є. Стебницька, А. В. Прохорченко. *Збірник наукових праць Укр. держ. ун-ту залізнич. трансп.* 2022. Вип. 199. С. 99-113. DOI: 10.18664/1994-7852.199.2022.258820.
35. Ward J. H., Jr. Hierarchical Grouping to Optimize an Objective Function, *Journal of the American Statistical Association*. 1963. 58. P. 236-244.

Andrii Prokhorchenko, Dmytro Kharchenko, Andrii Kyman, Mykhailo Kravchenko Ihor Zhukovytsky

RESEARCH ON TRAIN FLOW PRIORITIZATION RULES IN RAILWAY SYSTEMS

Abstract. In conditions of capacity deficits within the railway network, it is crucial to develop mechanisms to avoid overloading elements of the railway system. One approach to preventing overload is the establishment of transparent and efficient prioritization rules. Under such circumstances, research aimed at defining requirements for prioritization rules is relevant, ensuring that, in accordance with operational conditions, the railway system's capacity deficit can be mitigated. The purpose of this study is to investigate train flow prioritization rules in various railway systems

worldwide to identify patterns, challenges, and effective practices in setting priorities. These insights aim to enhance or develop new prioritization rules that will improve the operational efficiency of Ukraine's railway system. According to a developed classifier of prioritization criteria used in railways globally, it has been proven that Ukraine's railway system employs a socially oriented criterion. An analysis of the legislative framework for setting train movement priorities revealed the absence of unified and transparent normative documentation in Ukraine to regulate prioritization rules. Priority is given to passenger trains, while criteria for prioritizing freight trains are lacking. Based on a comparative analysis of selected indicators from global railway systems, an excessively high punctuality rate (schedule adherence level) of passenger trains was identified in Ukraine's railway system. Using hierarchical clustering analysis with Ward's method, the numerical classification of Ukraine's railway as predominantly freight-oriented with limited passenger operations was confirmed. It was found that the existing priority given to passenger traffic distorts the system's properties. A hypothesis was proposed that the imbalance in prioritization between freight and passenger train movements in Ukraine's railway system leads to an excessively high schedule adherence rate for passenger trains, resulting in significant losses for freight transportation. The results obtained can be used in the management of Ukraine's railway system to enhance its operational efficiency.

Keywords: railway system, capacity, congested infrastructure, train flow, prioritization, punctuality.

Прохорченко Андрій Володимирович, доктор технічних наук, професор, професор кафедри управління експлуатаційною роботою, Український державний університет залізничного транспорту. ORCID iD: 0000-0003-3123-5024. Тел.: +38 (066) 635-76-01. E-mail: prokhorchenko@kart.edu.ua.

Харченко Дмитро Романович, аспірант, Український державний університет залізничного транспорту. ORCID iD: 0009-0005-3174-3231. Тел.: +38 (096) 50-53-057. E-mail: harchenko95@kart.edu.ua.

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

Кравченко Михайло Анатолійович, доктор філософії, докторант кафедри управління експлуатаційною роботою, Український державний університет залізничного транспорту. ORCID iD: 0000-0001-7445-8952. Тел.: +38 (057) 730-10-88. E-mail: m.kravchenkourf@gmail.com.

Жуковицький Ігор Володимирович, доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри Електронні обчислювальні машини, Дніпровський інститут інфраструктури і транспорту, Український державний університет науки і технологій. ORCID ID: 0000-0002-3491-5976. Тел.: +380503633573. E-mail: ivzhukl@ua.fm.

Prokhorchenko Andrii Volodymyrovych, Dr. Tech. Sciences, Professor, Professor of the Department of Operations Management of the Ukrainian State University of Railway Transport. ORCID iD: 0000-0003-3123-5024. Tel.: +38 (066) 635-76-01. Email: prokhorchenko@kart.edu.ua.

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

Kyman Andrii Mykolayovych, PhD, Associate Professor of Freight and Commercial Management of the Ukrainian State University of Railway Transport. ORCID iD: 0000-0002-4000-3287. Tel.: +38 (057) 730-10-75. Email: uermp@kart.edu.ua.

Kravchenko Mykhailo Anatoliyovych, PhD, Doctoral candidate of the Department of Operations Management of the Ukrainian State University of Railway Transport. ORCID iD: 0000-0001-7445-8952. Tel.: +38 (057) 730-10-88. Email: m.kravchenkourf@gmail.com.

Ihor Zhukovytsky, Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department of Electronic Computers, Dnipro Institute of Infrastructure and Transport, Ukrainian State University of Science and Technology. ORCID ID: 0000-0002-3491-5976. Тел.: +380503633573. E-mail: ivzhukl@ua.fm.

Асп. ЗАЛАТА А.С.

(Український державний університет залізничного транспорту)

Удосконалення системи збудження збудника тягового генератора тепловозів серії 2те116

Анотація. У статті розглянуто систему електричної передачі потужності тепловоза з акцентом на збудження та регулювання напруги тягового генератора. Зазначено, що підтримка сталої потужності дизеля шляхом регулювання напруги на виході випрямляча є важливим завданням.

Проаналізовано недоліки наявної системи збудження з використанням резисторів, що призводять до нестабільної роботи через нелінійність характеристики намагнічування і температурні зміни. Запропоновано впровадження блока регулювання напруги збудника типу ВС-650У2 – БРН-В, який забезпечує гальванічну розв'язку, самозбудження, підтримку та обмеження напруги і струму збудження, а також захист від короткого замикання.

Упровадження блока БРН-В дає змогу виключити зі схеми тепловоза кілька елементів, що покращує надійність і знижує потребу в обслуговуванні.

Ключові слова: тепловоз, тяговий

Вступ.

Електрична передача потужності тепловоза передбачає відбір потужності від дизеля, тому основною умовою економічної роботи тепловоза для електропередачі є сталість навантаження дизеля в більшому діапазоні зміни тягового навантаження. Електрична передача (силове коло) тепловоза 2ТЕ116 складається з трьох основних елементів: шестифазного синхронного генератора змінного струму, випрямної установки, шести паралельно з'єднаних тягових електродвигунів постійного струму з послідовним збудженням.

Тяговий генератор має незалежне збудження. Обмотка збудження розташована на 12 полюсах ротора і живиться від збудника випрямленим струмом через випрямний керований міст.

Струм навантаження змінюється під час руху поїзда відповідно до зміни опору руху та визначається сумарним струмом у тягових електродвигунах. Отже, для збереження сталості потужності дизеля необхідно змінювати напругу на виході випрямляча, а отже, напруга тягового генератора, що подають на випрямляч, зворотно пропорційна струму навантаження.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Проведення модернізації конструкції вузлів тепловозів, у тому числі електричної передачі можливе на підприємствах, що відповідають необхідному технічному рівню. Питання визначення технічного рівня виробництва з формуванням віртуального підприємства розглянуто в роботі [1];

генератор, система збудження, збудник. удосконалення електричної передачі тягового рухомого складу – у роботах [2-4] (однак переважно акцентовано на управлінні тяговими електродвигунами). У роботі [5] розглянуто можливість ідентифікації електричних машин за допомогою роботизованих засобів під час ремонту і модернізації.

Визначення мети та завдання дослідження.

Метою статті є дослідження та усунення недоліків у системі збудження електричної передачі тепловоза шляхом впровадження блока регулювання напруги збудника типу ВС-650У2 – БРН-В з метою покращення стабільності роботи, зниження потреби в обслуговуванні та підвищення безпеки експлуатації тепловоза.

Для досягнення сформульованої мети потрібно вирішити такі завдання:

- детально проаналізувати недоліки сучасної системи збудження електричної передачі тепловоза, зокрема вплив нелінійності характеристики намагнічування і температурних змін на стабільність роботи;

- розробити і обґрунтувати технічне рішення для блока регулювання напруги збудника типу ВС-650У2 – БРН-В, що забезпечує гальванічну розв'язку, самозбудження, підтримку та обмеження напруги і струму збудження, а також швидкодіючий захист.

Основна частина дослідження.

Обмотка збудження тягового генератора є навантаженням силового кола системи збудження, до якого входять збудник, керований випрямний міст і вузол корекції, що включає трансформатор і випрямний міст.

Як збудник застосовано однофазний синхронний генератор змінного струму. Збудження його здійснюється від загального кола живлення електричної схеми управління (від стартер-генератора) і подається на обмотку статора І1-І2. Вихідна змінна напруга збудника з кілець ротора С1-С2 подається на вхід випрямного керованого моста.

Струм збудження в колі тягового генератора регулюють зміною змінної напруги на виході збудника і напруги випрямлення випрямляча УВВ. Перше виробляється, як і в тягового генератора, шляхом збільшення частоти обертання ротора збудника з набором позицій контролера. За того самого струму збудження вихідна змінна напруга в обмотці ротора збудника збільшується пропорційно частоті обертання ротора і досягає на 15-й позиції найбільшого значення.

Витрати енергії на збудження синхронного тягового генератора складаються з витрат енергії на збудження самого синхронного генератора та синхронного збудника. Збудник призначений для живлення (через напівкерований випрямляч) постійним струмом обмотки збудження тягового генератора. Він належить до допоміжних тягових електричних машин і є однофазним синхронним генератором підвищеної частоти, захищеного виконання, з самовентильацією.

Основним завданням збудника є підтримка напруги на вході регулятора збудження тягового генератора залежно від частоти обертів колінчатого вала дизеля.

Система збудження збудника (рис. 1) реалізує це за допомогою задавання струму збудження збудника панелями опорів і компенсації струму навантаження збудника за допомогою трансформатора струму.

Така система має ряд недоліків:

1. Задавання струму за допомогою резисторів не може забезпечити підтримку напруги збудника у всьому діапазоні частот обертання дизеля через нелінійність характеристики намагнічування збудника, технологічного розкиду його параметрів і температурної зміни опорів як задавальних резисторів, так і обмотки збудження збудника.

2. Потребує періодичної перевірки та обслуговування регульованих елементів (задавальних панелей опорів).

3. Живлення обмотки збудження збудника здійснюється від бортової мережі або акумуляторної батареї тепловоза.

Для усунення цих недоліків пропонується розробити і впровадити блок регулювання напруги збудника типу ВС-650У2 – БРН-В.

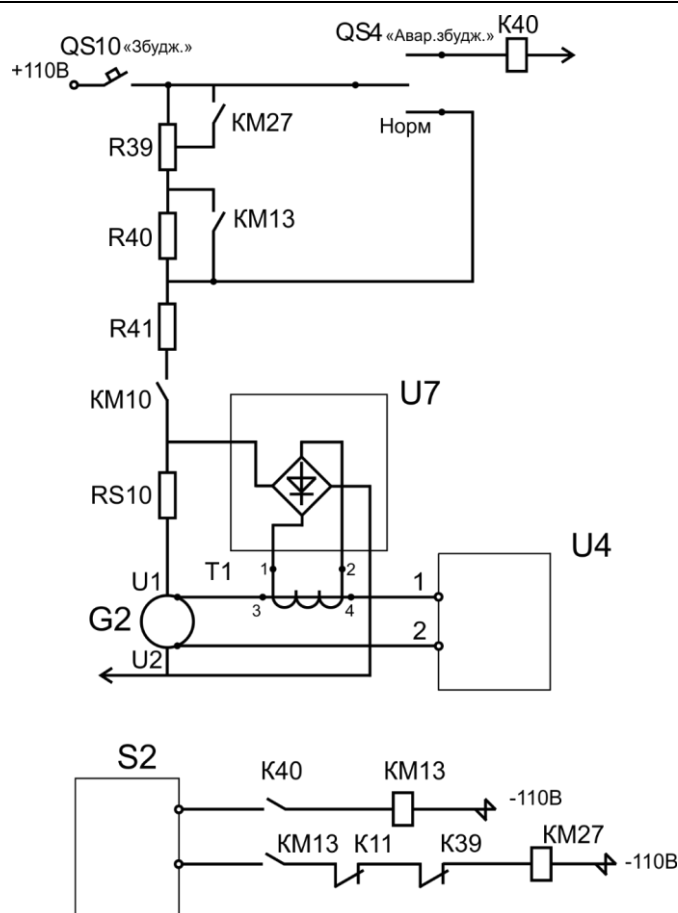


Рис. 1. Система збудження збудника ВС-650

Блок регулювання напруги збудника має забезпечувати:

- гальванічну розв'язку між вхідною та вихідною напругою на рівні не менше 1000 В;
- самозбудження збудника у всьому робочому діапазоні обертання колінчатого вала дизеля;
- підтримання напруги збудника залежно від частоти вхідної напруги в нормальному режимі роботи тепловоза;
- підтримання напруги збудника залежно від частоти вхідної напруги в аварійному режимі роботи тепловоза;
- обмеження струму збудження збудника на рівні $1,15I_{ном}$ за сигналом із шунта RS10;
- швидкодіючий захист від вихідних струмів короткого замикання, що перевищують $1,25I_{ном}$;
- індикацію режимів роботи і захисту як на лицьовій панелі блока за допомогою світлодіодів, так і зовнішній (індикатори на панелі машиніста).

Розробляючи блок, необхідно передбачити два виконання як із цифровою локомотивною мережею (блок обладнаний каналом зв'язку типу CAN), так і стандартною (релейно-контакторна схема управління).

Структурно-функційна схема БРН-В наведена на рис. 2.

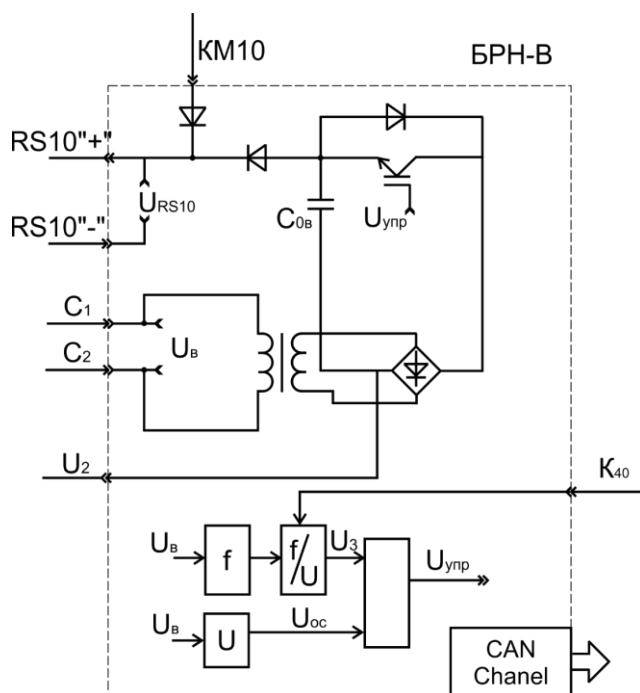


Рис. 2. Структурно-функційна схема БРН-В

З використанням блока БРН-В в системі збудження збудника типу ВС-650У2 із схеми тепловоза виключають:

- блок кремнієвих випрямлячів БВК-140У2 (U7);
- трансформатор струму ТТ-30М УХЛ2 (Т1);
- панелі опорів ПС-50315 УХЛ2, ПС-50125 УХЛ2, ПС-50237 УХЛ2 (R39...R41);
- електромагнітні контактори МК1-10У3А (KM13, KM27).

Система збудження збудника типу ВС-650У2 наведена на рис. 3.

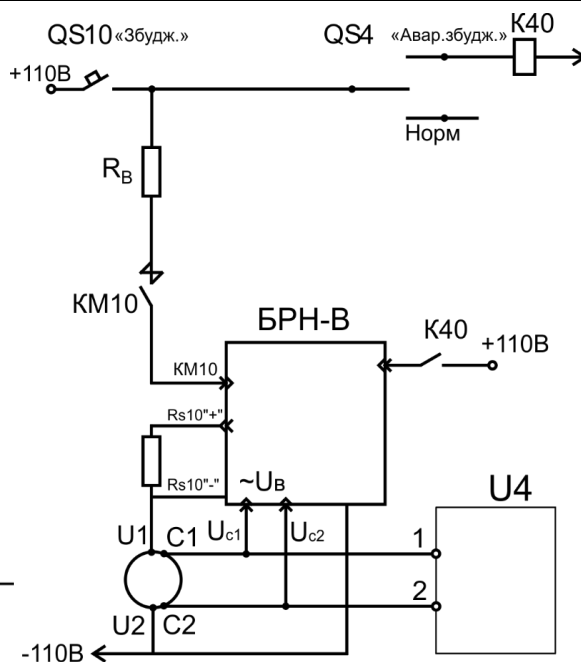


Рис. 3. Система збудження збудника типу ВС-650У2

Для створення збудження збудника в початковий момент його роботи використана нерегульована панель опорів типу ПС-50137 УХЛ2 (R_B).

Висновки.

Впровадження блока регулювання напруги збудника типу ВС-650У2 – БРН-В забезпечує більш стабільну роботу системи електропередачі тепловоза, підвищуючи її ефективність і надійність.

Виключення зі схеми тепловоза декількох компонентів, таких як блок кремнієвих випрямлячів і панелі опорів, знижує потребу в періодичному технічному обслуговуванні та перевірках.

Новий блок регулювання напруги забезпечує швидкодіючий захист від коротких замикань і перевищення струму, а також індикацію режимів роботи і захисту, що підвищує безпеку експлуатації тепловоза.

Список використаних джерел

1. Tartakovskiy E., Ustenko O., Puzyr V., Datsun Y. Systems Approach to the Organization of Locomotive Maintenance on Ukraine Railways. Rail Transport - Systems Approach / Ed. A. Śladkowski. Cham: Springer. 2017. P. 217-239. doi: 10.1007/978-3-319-51502-1_5.
2. Watanabe T., Yamashita M. Basic study of antislip control without speed sensor for multiple motor drive of electric railway vehicles. *IEEE*,

Proceedings of the Power Conversion Conference. April, 2002. Vol. 3. P. 1026-1032.

3. Ohishi K., Ogawa Y. Adhesion control of electric motor coach based on force nontrol using disturbance observer. *IEEE, Advanced Motion Control*. April, 2000. P. 323-328.

4. Park D., Kim M. Hybrid readhesion control method for traction system of highspeed railway. *IEEE, Proceedings of the Fifth International Conference on Electrical Machines and Systems*. August, 2001. Vol. 2. P. 739-742.

5. Puzyr V., Datsun, Y., Obozny O. Design of algorithm for identification of locomotive electrical machine unit during repair. *International Journal of Engineering & Technology*. 2018. Vol. 7. Is. 4. P. 157-161. DOI: 10.14419/ijet.v7i4.3.19727.

Залата Андрій Сергійович, аспірант кафедри експлуатації та ремонту рухомого складу, Український державний університет залізничного транспорту. ORCID iD: 0009-0003-0557-795X. Тел.: +38 (097) 710-69-81. E-mail: zalata.ac@gmail.com.

A. Zalata

IMPROVEMENT OF TRACTION GENERATOR EXCITATION SYSTEM OF THE DIESEL LOCOMOTIVE 2TE116 SERIES

Abstract. *The article examines the system of electric power transmission of a diesel locomotive, which involves taking power from a diesel engine, with an emphasis on the excitation and voltage regulation of the traction generator.*

The importance of maintaining constant diesel power under variable traction loads is emphasized. The importance of adjusting the excitation current to maintain constant diesel power, which is achieved by changing the voltage at the output of the rectifier, is emphasized. The role of an exciter, a controlled rectifier bridge and a correction unit, which includes a transformer and a rectifier bridge, is described.

The shortcomings of the existing excitation system are pointed out, in particular, the assignment of current using resistors that do not provide voltage support in the entire range of diesel engine rotation frequencies due to the nonlinearity of the magnetization characteristics of the exciter, the technological spread of parameters and temperature changes in resistances. The need for periodic inspection and maintenance of regulated elements is also noted.

In order to eliminate these shortcomings, it is proposed to develop and implement a voltage regulation unit of the VS-650U2 BRN-B exciter type. The introduction of the BRN-B block allows to exclude several components from the circuit of the locomotive, such as the block of silicon rectifiers, current

transformer, resistance panels and electromagnetic contactors, which simplifies the system and reduces the need for maintenance. The structural and functional scheme of the new excitation system, which demonstrates the advantages of introducing a voltage regulation unit, is considered.

The proposed technical solution increases the reliability and efficiency of the diesel locomotive, reducing operating costs and increasing the stability of power transmission.

Keywords: locomotive, traction generator, excitation system, exciter.

Zalata Andrii, postgraduate student, department of maintenance and repair of rolling stock, Ukrainian State University of Railway Transport. ORCID iD: 0009-0003-0557-795X.

Tel.: +38 (097) 710-69-81. E-mail: zalata.ac@gmail.com.

Д-р техн наук КРАШЕНІНІН О.С.,
магістрант КОСЕНКО В.М.

(Український державний університет залізничного транспорту)

Оцінювання ефективності запровадження сервісу в систему ремонту врс

Анотація. У статті розглянуто питання оцінювання ефективності сервісу для високошвидкісного рухомого складу як складової підвищення якості його обслуговування та ремонту. Порівнено ефективність планово-попереджувальної та предиктивної систем його виконання, а також розглянуто систему розумного предиктивного обслуговування, що дає змогу прогнозувати стан обладнання за допомогою моніторингу динаміки його показників. Оцінювання ефективності сервісу розглянуто в рамках контракту життєвого циклу (КЖЦ), який не тільки забезпечує підвищення рівня технічного стану рухомого складу, а й знімає з перевізника необхідність контролю його стану і дає змогу сконцентруватися на виконанні перевезень. Також оцінено перспективи використання сучасних технологічних рішень для виконання ТОіР задля підвищення продуктивності виробництва.

Ключові слова: сервіс, обслуговування, ремонт, тяговий рухомий склад, предиктивна система, інтероперабельність, контракт життєвого циклу.

Вступ.

Підвищення ефективності перевезень є прагненням кожної залізничної компанії задля підвищення прибутку. Збільшення коефіцієнта використання парку високошвидкісного рухомого складу, швидкості руху, об'ємів перевезення за скорочення витрат на утримання постійно мотивує до розвитку, покращення та пошуку нових рішень. Перспективним і ефективним рішенням, у тому числі для АТ «Укрзалізниця», є оновлення парку рухомого складу, особливо коли його знос перевищує 90 %, що за сучасних умов складно реалізувати. До того ж новий рухомий склад потребує нового, більш досконалого підходу для організації ремонту, а з закупівлею закордонного ВРС виникає потреба в локалізації процесів ТОіР задля уникнення величезних втрат часу та фінансів на пересилання локомотивів на ремонт або запрошення закордонних спеціалістів-ремонтників. Одним із шляхів вирішення цього питання є організація системи сервісу для ВРС сторонніми компаніями.

Аналіз останніх досліджень і публікацій.

Система сервісу є дуже розвинутою, вигідною та популярною на закордонних високошвидкісних залізницях [10-13]. Але через відсутність високошвидкісного руху на території України вона не набула популярності та відповідно, не отримує відчизняних розробок. Тому є важливим показати її переваги та вигоду порівняно з традиційною

системою ТОіР [1, 2, 5] і стимулювати розвиток та інновації у сфері відчизняного технічного обслуговування та ремонту.

Визначення мети та завдання дослідження.

Метою дослідження є визначення головних переваг запровадження сервісу для ВРС проти традиційної системи ТОіР, порівняння способів його виконання, оцінювання використання сучасного підходу управління процесом обслуговування та ремонту «Контракт життєвого циклу», перспективних сучасних технологій допомоги та автоматизації: технічний зір, 3D-принтери, роботи.

Для досягнення сформульованої мети потрібно вирішити такі завдання:

- проаналізувати досвід запровадження сервісу та способів його реалізації: планово-попереджувальним і предиктивним, оцінити його переваги та недоліки для ВРС;
- проаналізувати ефективність моделі контракту життєвого циклу рухомого складу та моделі управління життєвим циклом ТРС і ВРС і скласти порівняльну характеристику;
- оцінити використання перспективних цифрових технологій у процесі обслуговування та ремонту і опрацювати пропозиції щодо впровадження деяких із них для ВРС.

Основна частина дослідження.

Суть сервісу полягає в передаванні повноважень та обов'язків щодо проведення

технічного обслуговування і ремонту рухомого складу приватним комерційним компаніям, зацікавленим у виконанні таких послуг за відповідну грошову винагороду. Це дає змогу перевізнику сконцентрувати свої зусилля на ефективній експлуатації поїздів і забезпеченні руху, а сервісна компанія забезпечить їхній належний технічний стан і постійну модернізацію процесу ремонту і конструкції локомотивів відповідно до потреб власника. При цьому оплату здійснюють не за обсяг виконаного ТОіР, а кілометри корисного пробігу локомотива та його час перебування в експлуатаційному парку. Отже, сервіс заробляє не за виконання якнайбільшої кількості ремонтів, а навпаки, забезпечуючи перебування високошвидкісного рухомого складу в експлуатації якомога більше часу, у тому числі зменшення кількості та тривалості ремонтів для безумовної якості їх виконання та забезпечення руху. Завдяки такій системі оплати повністю виключено випадки, коли сервіс навмисно затягував би процес ремонту і завищував його обсяги задля підвищення власного прибутку. При цьому договір на виконання сервісу має відповідати певним вимогам, відомими як Service Level Agreement, які визначають рівень очікуваного обслуговування та ремонту, встановлюючи показники, за допомогою яких визначають якість надаваних послуг, а також засоби правового захисту або штрафів, якщо такі є, якщо рівень сервісу не буде досягнутий. Головним показником надійності сервісу є коефіцієнт технічної готовності [7]

$$K_g = \frac{t_w}{t_w + t_p}, \quad (1)$$

де K_g – коефіцієнт технічної готовності;
 t_w – сумарний час справної роботи;
 t_p – сумарний час вимушених простоїв.

Для переходу до імовірнісного трактування величини t_w і t_p замінюють математичними сподіваннями часу між сусідніми відмовами і часу відновлення відповідно:

$$K_g = \frac{t_{cp}}{t_{cp} + t_B}, \quad (2)$$

де t_{cp} – середній наробіток до відмови;
 t_B – середній час відновлення.

Але через те що експлуатацією займається перевізник, дохід сервісної компанії не повністю залежить від неї, особливо за неефективного управління процесами перевезень. Через це фінансова прибутковість в основному визначена собівартістю обслуговування та ремонту. Тому ефективними шляхами збільшення прибутку є

підвищення ефективності системи ТОіР, розвиток і модернізація методів, систем, оснащення технічного забезпечення сервісу, зменшення кількості позапланових ремонтів, оптимізація технологічного процесу для економії часу на ТОіР. Отже, сервіс постійно прагне до покращення та оптимізації технологічного процесу ремонту.

На сьогодні є дві альтернативні системи виконання сервісного ТОіР: планово-попереджувальна (або превентивна) і предиктивна (англ. predict – передбачити). Планово-попереджувальний ремонт являє собою сукупність технологічних заходів та операцій, спрямованих на забезпечення працездатності ТРС або ВРС шляхом проведення відповідного технічного обслуговування і ремонту і, за потреби, заміни деталей і вузлів, що зазнали значного зношення, за заздалегідь складеним планом. Структура ремонтного циклу – це визначений порядок і послідовність видів обслуговуючих ремонтних робіт у період між випуском ТРС із заводу та першим капітальним ремонтом або двома капітальними ремонтами [1, 2, 5]. До переваг цієї системи можна віднести забезпечення руху завдяки виконанню необхідних робіт заздалегідь із метою попередження відмови та можливість наперед формувати план ремонту. Але через наявність великої кількості зайвих операцій для обслуговування вузла, коли це не є необхідністю, виникають зайві витрати, що є значним недоліком [1, 2].

На території Європейського Союзу ВРС експлуатовано уже дуже тривалий час і є одним із найінноваційніших у світі (зокрема французький TGV, який 3 квітня 2007 року встановив рекорд швидкості 574,8 км/год), у зв'язку з чим процес технічного обслуговування та ремонту дуже розвинений. Саме такі гіганти, як Alstom, Bombardier, Siemens, почали першими передавати свій високошвидкісний рухомий склад виробнику для проведення ТОіР завдяки розумінню, що застосування такого підходу дає виробнику додатковий стимул для вдосконалення конструкції рухомого складу, підвищення його ефективності та надійності, організації постачання технологічного обладнання та оригінальних запчастин. Але, звісно, кожна країна має свої особливості рухомого складу або залізниці, через що порядок проведення ТОіР відрізняється. Так, наприклад, в Іспанії експлуатовані дві залізниці шириною 1668 та 1435 мм, що стимулювало розроблення розсувної колісної пари, яка потребує більш частого, суворого та об'ємного обслуговування. Французькі високошвидкісні поїзди сімейства TGV задля досягнення великих швидкостей проходження кривих обладнані системою нахилу кузова вагонів, що також потребує додаткових вимог і збільшення об'ємів ТОіР. Але при цьому діють єдині вимоги щодо утримання колії,

контактної підвіски та сигналізації стандарту ETCS level 1. Повної відмови від планово-

попереджувального ТОiP також не відбулося, як показано на рис. 1.

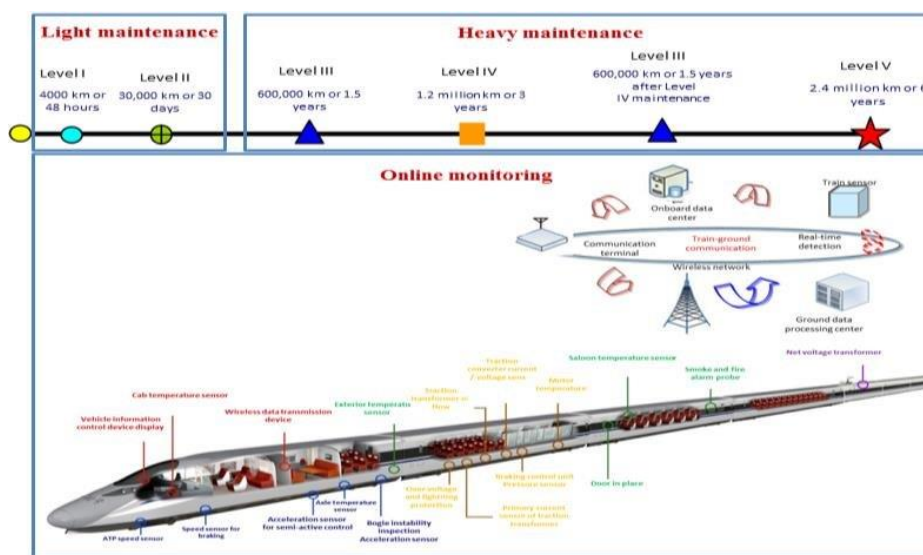


Рис. 1. Порядок обслуговування високошвидкісних поїздів TGV і їх моніторингу

Однією з розробок контролю справності рухомого складу є система ATOMS виробництва Acellent, призначена для виконання моніторингу структурного здоров'я (Structural Health Monitoring, SHM) несучих компонентів ВРС. Ключові функції системи подано на рис. 2. Вона може бути під'єднана до системи комунікації поїзда та забезпечувати діагностику пошкоджень у реальному часі під час руху. Після того як поїзд

запущено, система Acellent SHM також вмикається. Вона працює під час зупинок поїзда на кожній станції свого шляху. Система виконує семиетапний процес: збирання даних, оцінювання даних, діагностика працездатності, відстеження параметрів працездатності, звіт про працездатність, попередження та оновлення стану працездатності після ремонту [12].

ATOMS (Active Train Online Monitoring System)

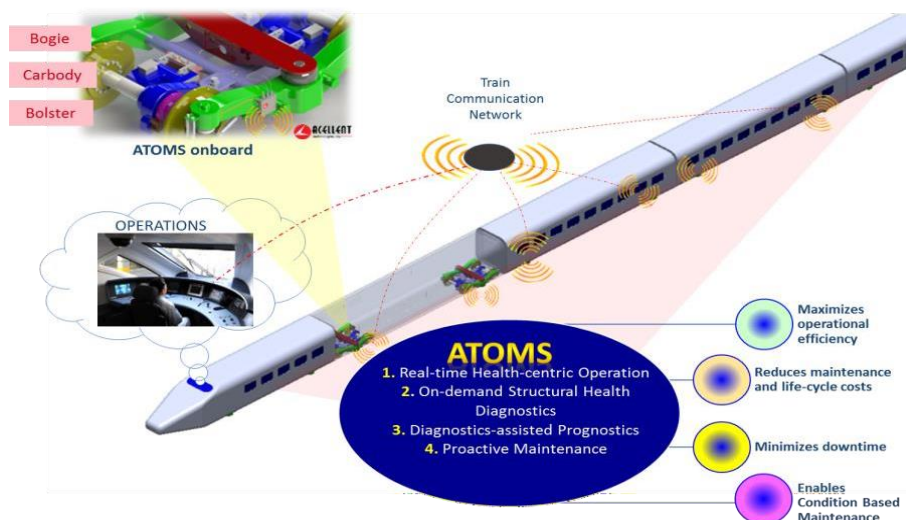


Рис. 2. Загальний огляд системи ATOMS

Значний стрибок у розвитку неймереж останніми роками стимулював більш широке використання цифрових двійників для

моделювання можливих сценаріїв виникнення несправностей. Для цього зазвичай створюють ідентичну модель потрібного вузла та спрощену модель рухомого складу з іншим обладнанням,

якщо в цьому є необхідність. Прикладом є компанія SIMPACK, яка за таким принципом створила свою динамічну модель високошвидкісного поїзда, що дає змогу визначити знос колісної пари методом зворотного поширення помилки (bsckpropagation neural network, BPNN). Цей метод має значні переваги порівняно з іншими нейронними мережами (наприклад нейронною мережею радіальної базисної функції):

- можливість нелінійного планування;
- здатність до самонавчання та адаптації;
- здатність застосовувати результати навчання до нових знань;
- відмовостійкість.

Основна ідея алгоритму зворотного поширення помилки полягає в тому, щоб шар за шаром поширювати помилку вихідного шару назад для опосередкованого обчислення прихованої помилки шару. Оскільки тришарового BPNN достатньо для більшості інженерних застосувань, у цьому дослідженні тришаровий BPNN використовують для обробки щоденних вимірюваних даних для класифікації глибини зносу всіх коліс високошвидкісного поїзда.

Система предиктивного ремонту полягає в передбаченні стану вузла у близькому майбутньому на основі інформації, отриманої завдяки автоматизованому безперервному діагностуванню та аналізу роботи пристроїв безпеки в процесі експлуатації з наступним передаванням у сервісне депо ремонтному персоналу інформації про наявність параметрів, що відхиляються від еталонних, і помилки в роботі певних пристроїв або вузлів, а також рекомендацій щодо виправлення відповідних несправностей. Завдяки постійному вимірюванню параметрів стану обладнання за допомогою датчиків і сенсорів на ТОiP високошвидкісний рухомий склад відправляють лише тоді, коли відбувається невідповідність нормативним значенням показників конкретних вузлів. Така система отримала назву Smart Predictive Maintenance System – система розумного предиктивного обслуговування. Безперервне спостереження за роботою обладнання локомотива і великий ступінь автоматизації обслуговування та ремонту попереджає виникнення пошкоджень і відмов із вірогідністю близько 100 %, а також допомагає регулярно економити значний об'єм фінансових ресурсів на проведення ТОiP [1, 5]. Завдяки цьому відбувається ефективно запобігання виникненню несправностей і відмов завдяки їх своєчасному виявленню за допомогою датчиків і передавання цієї інформації в сервісне депо для підготовки виконання ремонту. При цьому відбувається суттєва оптимізація витрат, адже ремонт і обслуговування здійснюють виключно за потреби, а не регулярно за графіком, що дає змогу уникнути

зайвих витрат на часті перевірки та ремонти. До того ж виключені ситуації, коли обладнання працює в несправному стані через невизначену несправність, адже система одразу сповістить про неї та необхідність виконання ремонту. Завдяки вчасному обслуговуванню виключений надмірний знос обладнання, але при цьому непотрібні перевірки та розбирання обладнання. Але впровадження предиктивної системи має досить високу вартість, адже встановлення датчиків, бортових комп'ютерів і відповідного програмного забезпечення, навчання персоналу та організації комунікації всіх задіяних АСУ між собою потребує значних капіталовкладень. Іншою проблемою є налаштування системи та її пристосування для різних типів обладнання, що часто потребує залучення експертів і часу на адаптацію. Особливо складно, коли сучасне обладнання або програмне забезпечення несумісне з новим обладнанням – це викликає потребу нових інвестицій в оновлення системи та пристосування до її роботи. Ураховуючи всі перераховані вище переваги та недоліки обох систем обслуговування та ремонту, можна вважати, що кращим варіантом буде так звана змішана система ТОiP, у якій деякі вузли все ще обслуговують періодично після певного пробігу або часу експлуатації, а інші – моніторять датчиками та сенсорами системи предиктивного ремонту і обслуговують відповідно за потреби. Це дає змогу економити значні кошти для контролю параметрів, до яких не висувають високі вимоги щодо точності та якості контролю. У такий спосіб досягають оптимальних витрат на експлуатацію локомотива за його доцільного використання та обслуговування.

Предиктивна частина змішаної системи ТОiP реалізована так: на вузлах рухомого складу розміщують датчики та сенсори для контролю їхньої роботи і об'єднують у єдину систему, якою управляє бортовий комп'ютер, після знімання показників їх відправляють на сервер, де обробляють і зберігають, після чого залежно від реалізації результати можуть відображатися відповідальному персоналу, який ухвалює рішення про необхідність проведення ТОiP, або ж система робить це сама. Схема роботи подана на рис. 3. Але її впровадження потребує автоматизації обліку несправностей у процесі роботи для своєчасного виявлення передвідмовних станів. Цього досягають забезпеченням обміну даними між системою автоматичної діагностики та системами фіксації та обробки даних, наприклад бортовий комп'ютер і/або електронна версія журналу ТУ-152Е. На цій основі потім можна запровадити автоматичний контроль та управління ТОiP за допомогою електронного журналу ТУ-28Е, або більш продвинутою системою «Мережевий графік», яка автоматично обробляє ТУ-152Е і планує час та обсяг проведення

ремонтів, аналізує характер і частоту виникнення несправностей і дає рекомендації щодо їх усунення та запобігання. Найголовнішою інновацією, яка об'єднує всі ці напрями, є створення спеціального інструменту «Електронний паспорт локомотива». Така система містить або має доступ до (залежно від типу зберігання даних) даних випробувань обладнання окремо та ВРС в цілому, результатів діагностики та дефектоскопії, статистики відмов і поломок, заміни обладнання, виконуваних технічного обслуговування та ремонтів. Це дає змогу на кожному етапі ТОiР не тільки виконувати необхідний обсяг робіт для забезпечення справного стану ТРС, але й вживати заходів щодо

підвищення їхньої якості, надійності обладнання та зменшення кількості ремонтів, автоматизувати процеси передавання локомотива на обслуговування чи ремонт, визначати обсяг робіт, перевіряти наявність запасних вузлів та ін. Також однією зі складових є АСУ «Вартість життєвого циклу онлайн», яка має особливий інтерес завдяки можливості збирати і аналізувати великі об'єми інформації про економічну ефективність локомотива за весь час його експлуатації до моменту утилізації і разом з цим виявляти проблеми зниження ефективності та пропонувати рішення для покращення рентабельності експлуатації [9].

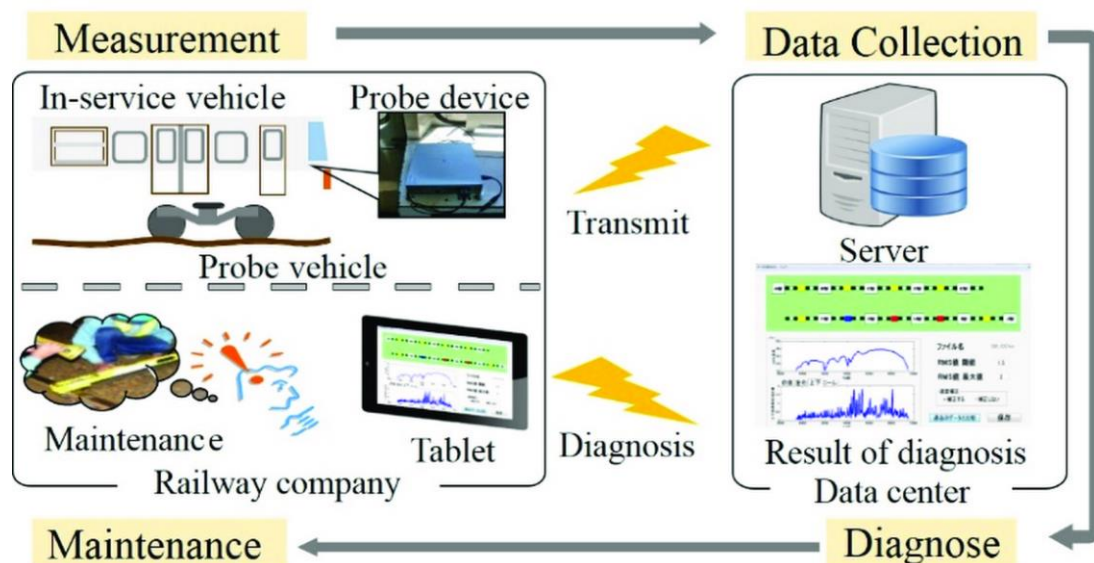


Рис. 3. Схема роботи предиктивної діагностики

Але слід зазначити, що технічний стан ВРС – це синергія багатьох факторів, серед яких не тільки відповідне конструктивне рішення і технологія обслуговування, а й безпосередньо якість обслуговування. Стрімке та постійне вдосконалення конструкції високошвидкісного рухомого складу призводить до його ускладнення (електричних апаратів, електронного силового обладнання на базі тиристорів і транзисторів типу IGBT, мікропроцесорних систем управління та ін.), через що ремонт та обслуговування потребує не просто високої кваліфікації працівників і більшого часу на ремонт, але і їх постійного вдосконалення. Це створює необхідність вдосконалювати систему ТОiР, що ускладнює експлуатацію ВРС і сприяє виникненню проблем для компанії-перевізника.

Через це всі перевізники світу переходять на систему обслуговування та ремонту за контрактом життєвого циклу (КЖЦ, Life Cycle Contract) силами виробника. КЖЦ є довгостроковою угодою, зазвичай тривалістю понад 20 років [4], на проєктування, виробництво, постачання,

обслуговування, ремонт і утилізацію тягового рухомого складу на фінансових умовах відповідно до договору. Оплата послуг з обслуговування та ремонту відбувається за звичною системою, при цьому викладені в контракті принципи та засади взаємодії сторін можуть допускати можливість передавання своїх зобов'язань щодо обслуговування та ремонту ТРС іншим сервісним компаніям, але виробник все ще відповідальний за виконання або невиконання умов контракту. КЖЦ також відрізняється більш високими та жорсткими вимогами щодо якості та суворості виконання технічного обслуговування та ремонту рухомого складу, його надійності, відомими у світі як «Service Level Agreement» (SLA) [3]. При цьому різко посилюються штрафні санкції за невиконання умов контракту. Особливо цікавим є КЖЦ від виробника ВРС, який має змогу порівнювати вартість виготовлення та вартість обслуговування ВРС і, отже, визначати оптимальні витрати, як показано на рис. 4 [7].

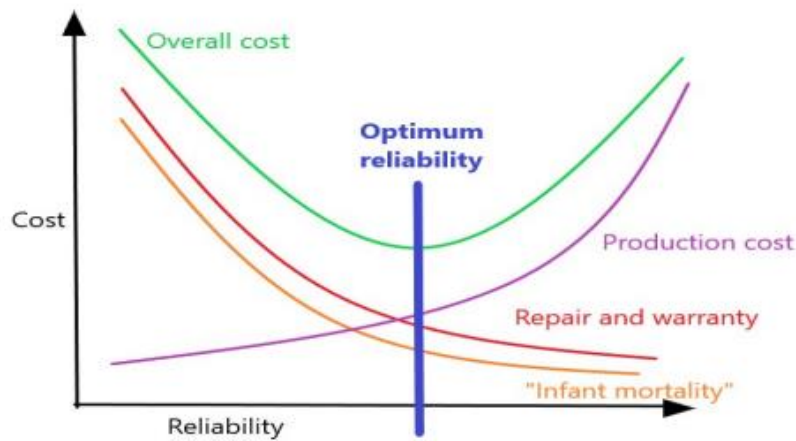


Рис. 4. Графік порівняння вартості та надійності

Алгоритм управління контрактом життєвого циклу відрізняється наявністю зворотного зв'язку, що забезпечує його роботу за принципом замкненого циклу постійного покращення Едварда Демінга «PDCA» (Plan, Do, Check, Act). Завдяки цьому можливий не лише ремонт несправностей, а й їх аналіз та усунення на стадії будівництва інших серій або моделей локомотивів, модернізація наявних і отримання достовірних даних, які підтверджують працездатність і ефективність пристроїв і вузлів локомотива після проведення ТОіР.

Використовуючи результати досліджень, наведені в роботі [6], можна показати перевагу постачання електропоїзда ЕКр1 за умовами контракту життєвого циклу, використовуючи метод «зважених оцінок». Для цього виберемо найважливіші критерії сервісу, визначимо їхню важливість і проставимо оцінки за відповідного способу постачання ВРС. У такий спосіб можна визначити, що варіант закупівлі електропоїздів «Тарпан» за типовим договором поставки з

наступним укладанням договору на ремонт і обслуговування з третьою стороною є найменш бажаним. Хоча витрати на обслуговування є найнижчими і тому найпривабливішими, за цим варіантом це позначається на низькій якості ТОіР, що призводить до зниження надійності локомотива та економічних збитків. У той же час поставка такого рухомого складу за контрактом життєвого циклу виявилася кращою з приблизно однаковим результатом як з укладанням договору зі сторонньою сервісною компанією, так і заводом-виробником. За безпосереднього обслуговування від заводу-виробника отримують найвищу якість обслуговування та ремонту і через це, як наслідок, високу надійність і безпеку, але за значної його вартості. КЖТ з обслуговуванням сторонньою сервісною компанією різко відрізняється нижчою якістю ТОіР, але відповідно має меншу вартість із кращим рівнем логістики запчастин, що також робить привабливим вибір за невеликої рентабельності перевезень (таблиця).

Таблиця

Порівняння поставки ЕКр1 методом зважених оцінок

Критерій	Важливість критерія	Варіант поставки рухомого складу					
		не КЖЦ		КЖЦ з обслуговуванням від сервісної компанії		КЖЦ від заводу-виробника	
		Оцінка варіанту	Загальний балл	Оцінка варіанту	Загальний балл	Оцінка варіанту	Загальний балл
Якість обслуговування та ремонту	4	1	4	3	12	5	20
Вартість сервісного обслуговування	3	5	15	3	9	2	6
Рівень організації логістики запчастей та матеріалів	2	5	10	5	10	2	4
Ступінь залучення контрагентів в життєвому циклі локомотива	1	1	1	3	3	5	5
Результат		30		34		35	

Перспективним кроком у покращенні якості сервісу є проєкт «Цифрове депо», який передбачає автоматизацію та цифровізацію рутинних процесів, передавання та обмін інформацією, процеси управління персоналом, постановку та визначення обсягів робіт на обслуговування або ремонт, процеси формування оперативної звітності та реалізації моніторингу показників, а також використання нових підходів до ремонту, таких як технічний зір і доповнена реальність, 3D-принтери, роботи.

Одним із найпроривніших напрямів сучасних технологій Інтернету Речей є «цифровий зір», який дає змогу за допомогою даних, отриманих із цифрових відеокамер, розпізнавати різні об'єкти: людей, предмети, номери вагонів, УЗД і багато іншого. У локомотиворемонтному комплексі цифровий зір знайшов корисне застосування під час діагностування локомотива за допомогою планшетних комп'ютерів (рис. 5, а) та огляду поїзда, що стоїть на колії, за допомогою камер спостереження (рис. 5, б) і навіть робіт. На залізничному транспорті провідних локомотиворемонтних компаній уже налагоджено технологію розпізнавання профілю бандажа колісної пари та діагностування його технічного стану. Також здійснюють спроби перенесення місця роботи машиніста у стаціонарний офіс із дистанційним управлінням рухом поїзда, а також безпілотне ведення поїзда автоматичною системою управління з розпізнаванням перешкод,

сигналів світлофорів і знаків, положення стрілочних переводів та ін.



Рис. 5. Цифровий зір на залізничному господарстві:

а – розпізнавання деталей вузла для ремонту;
б – розпізнавання номера вагона

Іншою дуже корисною інновацією Індустрії 4.0 є 3D-принтери. У ремонті високошвидкісного рухомого складу це насамперед друкування деталей, що були зняті з виробництва або їх важко отримати, деталі з великими вимогами щодо якості виготовлення, різні пластикові елементи, такі як перемикачі, корпуси, панелі та інше. Сьогодні для тривимірного друку використовують кілька десятків видів металевої сировини у форматі сферичних гранул розміром від 4 до 80 мікронів (рис. 6, а), різні металеві стрижні для наплавлення (рис. 6, б) або мотки пластикового дроту. При цьому щільність матеріалу друкованих деталей перевищує показники лиття, а також майже відсутні відходи матеріалів і досягнено максимальної точності виготовлення. Найбільш популярні металеві порошки для 3D-друку бувають як на основі кольорових металів (алюмінієві, титанові, мідні, кобальт-хром), так і зі сплавів, в основі яких залізо. Головними перевагами такої технології є можливість виготовлення пластикових деталей будь-якого кольору, форми, складності і металевих деталей із високими вимогами щодо допуску, міцності, якості обробки поверхні, відсутні внутрішні напруження після виготовлення, зазвичай нема потреби обробляти поверхню, виробити складної

форми виготовляють набагато швидше, ніж традиційним литтям і подальшою обробкою, при цьому швидкість виготовлення деталей зазвичай вища, ніж швидкість їх доставлення після замовлення з інтернету або у спеціалізованого постачальника.

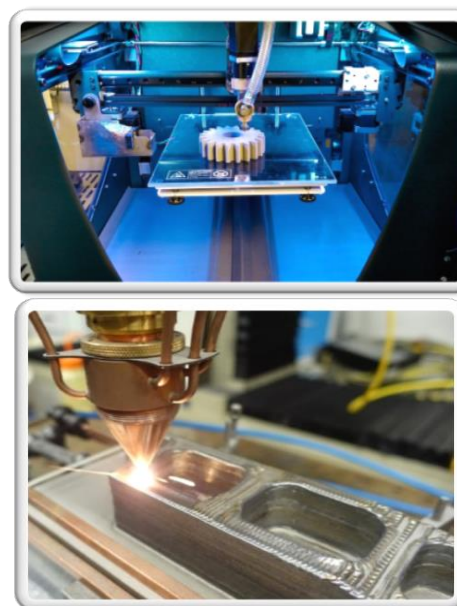


Рис. 6. Результат 3D-друку металевим порошком (а),
3D-друк металевої деталі наплавленням (б)

Також велику перспективу мають роботи, які дають змогу автоматизувати виконання однотипних операцій. На сьогодні їх уже можуть використовувати для перевірки стану штучних споруд у важкодоступних і віддалених місцях, стану контактної підвіски, загального стану верхньої будови колії або рухомого складу, розміщеного на оглядовій канаві (рис. 7, а). А компанія Alstom у співробітництві з ANYbotics вже показала своїх роботів-собак, які можуть виконувати огляд вагонів і рухомого складу під час їх стоянки та ремонту, при цьому завдяки своєму розміру вони можуть перемішуватися безпосередньо під візками та оглядати, наприклад, стан візків, колісну пару, гальмівне обладнання, тягові електродвигуни, які інакше оглянути можна тільки на оглядовій канаві депо (рис. 7, б) [10, 11]. Прикладом є робот Warthog, обладнаний позашляховим шасі, двома бортовими комп'ютерами та рукою-маніпулятором для переміщення невеликих запчастин чи інструменту або LiDAR сканером із кутом огляду 360 градусів для огляду колійного полотна, штучних споруд і рухомого складу. Іншим є робот ANYmal, обладнаний чотирма лапами та LiDAR сканером.

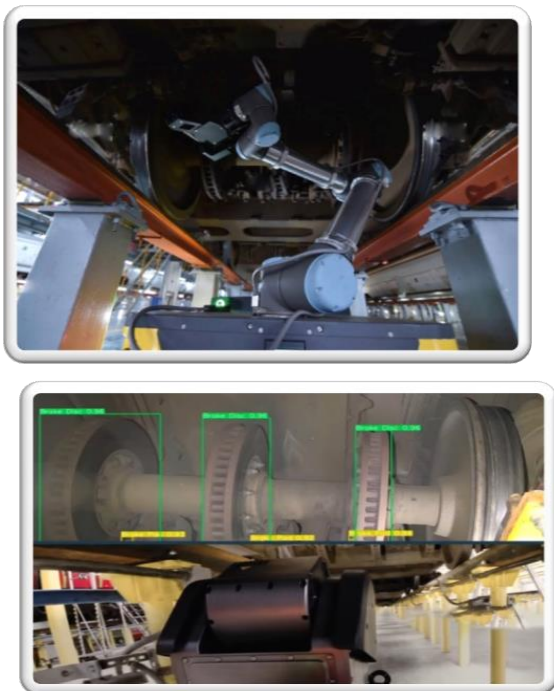


Рис. 7. Використання роботів для огляду високошвидкісного рухомого складу:
а – огляд роботом із рукою-камерою; б – вид «очима» робота виробництва Alstom

Завдяки такому шасі він має змогу підійматися до салону пасажирських вагонів для їх огляду, а також протискатися під рухомим складом та оглядати його знизу безпосередньо на станційних коліях.

Висновки.

Як показав досвід провідних закордонних компаній, система сервісу завдяки явному поділу обов'язків і відносин між перевізником і виконавцем сервісу, а також новій системі оплати послуг забезпечує значне зростання якості ТОiP високошвидкісного рухомого складу.

1. Глибокий аналіз планово-попереджувальної та предиктивної моделей сервісу та визначення їхніх переваг і недоліків дає змогу зазначити про доцільність використання змішаної моделі сервісу, за якої досягають оптимальних витрат на виготовлення сучасного ВРС і виконання його ТОiP.

2. Контракт життєвого циклу дає змогу значно підвищити якість виконання ТОiP завдяки вищим вимогам, зазначеним у Service Level Agreement, створенню перехідного запасу та постійній участі в життєвому циклі рухомого складу його виробника, але за вищої вартості.

3. Запровадження сучасних цифрових технологій дає змогу в майбутньому значно збільшити продуктивність сервісу завдяки підвищенню рівня автоматизації, продуктивності та безпеки процесу ремонту, частковій локалізації виробництва запчастей та online-допомозі працівнику для обслуговування або ремонту.

Список використаних джерел

1. Бабанін О. Б., Жалкін С. Г. Організація технічних обслуговувань локомотивів: конспект лекцій. Харків: УкрДУЗТ, 2017. Ч. 1. 53 с.
2. Положення про планово-попереджувальну систему ремонту і технічного обслуговування тягового та моторвагонного рухомого складу (електровозів, тепловозів, електро- та дизельпоїздів) / Міністерство інфраструктури України, Державна адміністрація Залізничного Транспорту, Укрзалізниця. Київ, 2015. 27 с.
3. Чукаєва І. К. Контракти життєвого циклу: можливості та ризики використання в рамках державно-приватного партнерства в Україні. *Формування ринкових відносин в Україні: зб. наук. праць*. 2019. № 4. С. 24-31.
4. Крашенінін О. С., Щипак Є. В., Матвієнко С. А., Шапатіна О. О. Обґрунтування оптимального терміну експлуатації тягового рухомого складу. *Зб. наук. праць ДонІЗТ*. 2011. № 25. С. 126-128.
5. Дацун Ю. М., Данько В. М., Клименко О. В., Максимов М. В. Основи технології ремонту

локомотивів: конспект лекцій. Харків: УкрДУЗТ, 2014. Ч. 1. 72 с.

6. Крашенінін О. С., Яковлев С. С. Оцінка конкурентоспроможності швидкісного рухомого складу українського виробництва. *Зб. наук. праць Укр. держ. ун-ту залізнич. трансп.* Харків: УкрДУЗТ, 2017. Вип. 174. С. 96-105.

7. Надійність залізничного рухомого складу: конспект лекцій / В. Г. Пузир, О. С. Крашенінін, О. В. Клименко, І. Г. Крамчанин. Харків УкрДУЗТ, 2020. 103 с.

8. Heidi Lundberg Reliability estimates in electronics industry. Reliability study in the HFC network. TUAS, Turku, Finland. 2020. ст 18.

9. Обозний О. М. Удосконалення процесів передрейсової підготовки локомотивів на основі електронного паспорту: дис. ... канд. техн. наук: 05.22.07. Харків, 2021. 162 с.

10. Alstom Smart maintenance through AI and robotics. URL: <https://www.youtube.com/watch?v=c9xOix-SsGY> (дата звернення 23.12.2024).

11. ANYbotics ANYbotics and Stadler Service AG Explore the Future of Train Maintenance. URL: <https://www.anybotics.com/news/robotic-inspection-in-train-maintenance/> (дата звернення 23.12.2024).

12. Spandan Mishra, Susheel K. Yadav, Taru Singhal, Howard Chung Hybrid prognostics model for Life cycle management of High Speed train. 2018. URL: <https://www.researchgate.net/publication/328998505> (дата звернення 23.12.2024).

13. Shuwen Wang, Hao Yan, Caixia Liu, Ning Fan, Xiaoming Liu, Chengguo Wang Analysis and prediction of high-speed train wheel wear based on SIMPACK and backpropagation neural networks. URL: <https://www.researchgate.net/publication/376521551>

(дата звернення 23.12.2024).

O. S. KRASHENININ, V. M. KOSENKO

Evaluation of the effectiveness of service introduction in the high-speed transport repair system

Abstract. Currently, over 90 % of Ukrainian Railways' rolling stock is completely worn out and require immediate replacement, but, considering new technologies and requirements for the construction of new locomotives, they would also require a new, higher quality maintenance. The answer to that problem would be organization of service system of high-speed transport, executed by third-party private companies. That would allow the carrier to concentrate its efforts on efficient operation of trains and ensuring traffic safety, while the service company will ensure proper technical condition of rolling stock and constant modernization of repair system. Payment is made not for the volume of maintenance performed, but for the kilometers of useful mileage of the locomotive and its time in the operating fleet. Today,

service have two popular execution systems: preventive repairment and predictive maintenance. Preventive repairment represents a set of technological measures and operations designed to ensure operability, executed according to a predetermined plan. Preventive maintenance consists in predicting the condition of the node in the near future based on information obtained through automated continuous diagnostics and analysis of devices during operation, with the subsequent transfer to the service depot of the repair personnel of this information about the presence of parameters deviating from the reference ones and errors in the operation, as well as recommendations for correcting the corresponding malfunctions. The most effective solution would be to implement so-called mixed system to ensure effective and optimal usage of financial resources for the operation of the locomotive with its appropriate use and maintenance. Another important part of the service is Life Cycle Contract, which is a long-term agreement (usually 20 years or more) on design, production, supply, maintenance, repair and disposal of high-speed rolling stock on financial terms in accordance with the contract. Additionally, the implementation of modern IT solutions is considered. They have the potential to greatly simplify the process of service and increase its production thanks to automation of certain processes and digitalization of data transfer and storage. Such technologies are: machine vision, augmented reality, 3D printers and robots.

Key words: service, proper technical condition, preventive repairment, predictive maintenance, constant modernization, Life Cycle Contract, kilometers of useful mileage.

Крашенінін Олександр Семенович, доктор технічних наук, професор кафедри експлуатації та ремонту рухомого складу, Український державний університет залізничного транспорту. Тел.: 097-991-10-99. E-mail: pomndu@ukr.net.

Косенко Вадим Миколайович, магістр кафедри експлуатації та ремонту рухомого складу, Український державний університет залізничного транспорту. Тел.: 097-971-36-67. E-mail: thetwinmoonknight@gmail.com.

Krashenin Olexander, Ph.D., professor of maintenance and repair of rolling stock Ukrainian State University of Railway Transport. Tel.: 097-991-10-99. E-mail: pomndu@ukr.net.

Kosenko Vadym, graduate student of maintenance and repair of rolling stock Ukrainian State University of Railway Transport. Tel.: 097-991-10-99. E-mail: thetwinmoonknight@gmail.com.

УДК 656.2

РИБАЛЬЧЕНКО Л. І., к.т.н., доцент

(Український державний університет залізничного транспорту)

Управління вагонопотоками на міжнародних залізничних маршрутах і шляхи підвищення ефективності

Розглянуто проблеми управління вагонопотоками на міжнародних залізничних маршрутах: оптимізацію процесів транспортування з урахуванням технічних, організаційних та інфраструктурних факторів. Запропоновано універсальну математичну модель, яка враховує час простою вагонів, витрати локомотивогодин, митні процедури і витрати на паливе. Проаналізовано ефективність застосування різних математичних методів, таких як лінійне програмування, генетичні алгоритми та методи прогнозування. У статті надано практичні рекомендації з удосконалення управлінських процесів і зменшення затримок за перевезень. Результати сприяють підвищенню ефективності залізничних вантажних перевезень і покращенню міжнародної логістики.

Ключові слова: управління вагонопотоками, оптимізація залізничної логістики, пропускна спроможність прикордонних станцій, планування графіка руху поїздів, вантажні залізничні перевезення, міжнародні транспортні коридори, інтеграція інформаційних систем у залізничний транспорт, обробка вагонопотоків, оптимізація руху вантажних потягів, моделювання залізничних операцій.

локомотивних бригад і технічні аспекти обслуговування вагонів.

Вступ.

Міжнародні залізничні перевезення – важливий компонент світової транспортної інфраструктури, що забезпечує ефективний обмін товарами між країнами та регіонами. Однією з основних складових цього процесу є організація вагонопотоків, що має велике значення для забезпечення своєчасності, безпеки та економічної ефективності перевезень. Оскільки кількість вантажних перевезень постійно зростає, зокрема через розширення міжнародної торгівлі, оптимізація вагонопотоків стає важливим завданням для залізничних компаній та операторів.

В останні роки на залізничному транспорті спостерігають тенденцію до впровадження новітніх технологій для управління логістичними процесами, що включають інтеграцію автоматизованих систем моніторингу, прогнозування та планування перевезень. Успішне управління вагонопотоками дає змогу не тільки знижувати витрати, але й підвищувати якість обслуговування, скорочуючи час простою вагонів і зменшуючи навантаження на інфраструктуру.

У статті розглянуто основні підходи для управління вагонопотоками на міжнародних залізничних маршрутах і запропоновано шляхи підвищення ефективності цього процесу з використанням сучасних математичних моделей, інноваційних технологій та управлінських стратегій. Зокрема, увага зосереджена на аналізі факторів, які впливають на оптимізацію перевезень, таких як затримки на прикордонних станціях, часові обмеження на роботу

Постановка проблеми дослідження.

Залізничний транспорт відіграє важливу роль у міжнародних перевезеннях вантажів, зокрема через свою спроможність транспортувати великі обсяги товарів на значні відстані з високою надійністю і ефективністю. Водночас організація вагонопотоків на міжнародних маршрутах є складним завданням, що потребує врахування численних факторів, які впливають на ефективність перевезень. Однією з головних проблем є оптимізація управління вагонопотоками, що включає мінімізацію часу простою вагонів, скорочення затримок на прикордонних станціях, ефективне використання локомотивних бригад і технічне обслуговування вагонів [2, 3].

Проте, незважаючи на значний прогрес у розвитку залізничної інфраструктури та використання новітніх технологій для моніторингу й управління логістичними процесами, існує потреба в удосконаленні методів організації вагонопотоків, зокрема в умовах складних міжнародних перевезень. Важливою проблемою є також необхідність узгодження планів перевезень між різними залізничними адміністраціями та адаптація до змінних умов, таких як сезонні коливання попиту, зміни тарифної політики, зміни у вантажному потоці та геополітичні фактори.

Це дослідження спрямоване на розроблення ефективних підходів і оптимізаційних стратегій для управління вагонопотоками на міжнародних залізничних маршрутах, ураховуючи обмеження та виклики, що виникають у реальному часі.

© РИБАЛЬЧЕНКО Л. І. 2024

Для вирішення цієї проблеми необхідно впровадити математичні моделі, що дають змогу максимально ефективно використовувати наявні ресурси, зменшувати витрати і підвищувати загальну ефективність процесів у міжнародних перевезеннях залізничним транспортом.

Аналіз останніх досліджень і публікацій.

В Україні питання оптимізації залізничних перевезень, зокрема управління вагонопотоками на міжнародних залізничних маршрутах, є важливою темою для досліджень. Останнім часом зростає кількість публікацій, присвячених використанню математичних моделей і технологій для покращення логістичних процесів у залізничному транспорті.

Дослідження підтверджують важливість застосування математичних методів для оптимізації руху вагонів, зокрема шляхом розроблення оптимальних графіків і зменшення часу простоїв на станціях. Виділено специфіку міжнародних перевезень і труднощі, що виникають на прикордонних станціях, де врахування особливостей митних процедур є критично важливим для управління вагонопотоками.

Сучасні автоматизовані системи управління демонструють ефективність моніторингу та контролю руху вагонів. Вони дають змогу мінімізувати затримки, скоротити витрати часу і знизити вплив людського фактора. Застосування таких систем особливо важливе для забезпечення безперервності міжнародних перевезень і координації логістичних процесів.

Покращення інфраструктури залізничних станцій і застосування технологій прогнозування значно підвищують ефективність перевезень. Урахування попиту, сезонних змін і можливих затримок через погодні чи технічні фактори дає змогу адаптувати планування маршрутів, знижуючи ризики збоїв у графіках. Використання великої кількості даних є перспективним інструментом для оптимізації цих процесів.

Економічні фактори також суттєво впливають на організацію міжнародних перевезень. Оптимізація маршрутів, зменшення витрат на паливе й час, що витрачають на перетин кордонів, є ключовими аспектами для підвищення ефективності логістики. Використання стратегій зниження витрат і впровадження енергоефективних технологій сприяє стабільності залізничних перевезень у сучасних умовах.

Цей аналіз свідчить про постійний розвиток українських досліджень у сфері оптимізації вагонопотоків на залізничному транспорті, а також наявність значних зусиль у напрямі автоматизації та інтеграції прогнозних технологій для підвищення ефективності міжнародних перевезень.

Визначення мети та завдання дослідження.

Мета дослідження полягає в удосконаленні методів управління вагонопотоками на міжнародних залізничних маршрутах, спрямованих на підвищення ефективності перевезень. Це включає розроблення оптимізаційних моделей, які враховують різні фактори, що впливають на якість логістичних операцій, і пошук шляхів для зменшення витрат і підвищення надійності роботи залізничного транспорту. Для досягнення мети необхідно вирішити такі завдання:

- розглянути основні аспекти організації вагонопотоків на міжнародних залізничних маршрутах з урахуванням особливостей роботи прикордонних станцій;

- розробити універсальну модель для оптимізації управлінських процесів з урахуванням різних факторів, які впливають на ефективність руху вагонів;

- оцінити ефективність застосування різних математичних підходів для вирішення проблем управління вагонопотоками, зокрема за допомогою сучасних методів прогнозування і оптимізації;

- визначити ключові фактори, які можуть покращити або ускладнити управління вагонопотоками, і розробити рекомендації з їх урахування у практиці.

Ці завдання дають змогу заглибитися в питання вдосконалення процесів перевезень, підвищення їхньої ефективності та усунення наявних проблем у роботі міжнародних залізничних сполучень.

Виклад основного матеріалу.

Організація вагонопотоків на міжнародних залізничних маршрутах – складний процес, що включає низку логістичних, технічних і адміністративних аспектів. Одним із ключових етапів цього процесу є ефективне управління рухом вагонів на прикордонних станціях, де перетинаються різні національні транспортні системи та інфраструктури. Це потребує детального планування та узгодження між різними країнами і залізничними адміністраціями.

Основні аспекти організації вагонопотоків:

- міжнародні транспортні коридори. Залізничні маршрути міжнародного сполучення часто включають транскордонні перевезення, де важливо забезпечити безперешкодне та своєчасне переміщення вантажів через кордони. Це передбачає використання спільних технічних стандартів, забезпечення безпеки та уникнення затримок, що виникають через митні формальності;

- прикордонні станції та їхні особливості. Прикордонні станції відіграють ключову роль у

забезпеченні пропускання поїздів між різними країнами. Тут перевіряють вантажі, змінюють локомотиви, а також відбувається координація між залізничними службами різних країн. Особливо важливою є організація операцій з перевантаження вантажу або зміни вагонів на станціях, що можуть бути обмежені пропускнуою спроможністю;

- митний контроль і перевірка документів. Після прибуття поїзда на прикордонну станцію проводять митний контроль, перевірку документації та телеграм: відповідність вантажів, митні формальності, надання дозволів для подальшого руху. Процес може бути затриманий через необхідність виконання кількох перевірок, що потребує координації з митними органами обох країн;

- планування часу обробки поїздів. Для уникнення затримок важливо чітко спланувати час виконання кожної операції на прикордонній станції – це не тільки сама обробка поїздів, але й час на виконання митних процедур, зміну локомотивів і виконання технічних оглядів;

- механізми управління вагонопотоками. Ураховуючи важливість швидкості і точності перевезень, необхідно застосовувати ефективні методи планування та управління вагонопотоками, що включають використання інформаційних систем для прогнозування руху вагонів, моніторингу виконання операцій і автоматизації процесів [6, 7].

Прикордонні станції є специфічними ділянками міжнародних залізничних маршрутів. Вони мають ураховувати технічні та організаційні вимоги обох країн, що можуть бути різними. Наприклад, для станцій, розташованих на

кордонах Європейського Союзу, характерна необхідність виконання додаткових процедур із перевірки документів і вантажів, що може збільшити час на проходження митного контролю.

Також слід зазначити, що багато прикордонних станцій мають обмежену пропускну спроможність, що може призвести до затримок, особливо за найбільших навантажень. Зміна локомотивів, перевірка вантажів і підготовка супровідної документації потребують чіткої координації між службами різних країн, а також відсутності технічних збоїв в інфраструктурі.

Увесь процес обробки поїздів на прикордонних станціях складається з кількох етапів, кожен із яких має важливе значення для загальної ефективності: операції зі збору інформації про поїзд, перевірка відповідності документації, митний контроль, зміна локомотивів, технічне обслуговування та відправлення поїзда.

Ураховуючи ці аспекти, технологічний графік, що відображує весь процес обробки поїзда на прикордонній станції, є важливим інструментом для забезпечення безперебійної роботи і ефективності руху вагонопотоків на міжнародних маршрутах.

Наступний етап – технологічний графік (рис. 1) обробки вантажного поїзда на прикордонній станції, який дасть змогу наочно продемонструвати послідовність операцій і час, необхідний для їх виконання, а також візуалізує розподіл часу між основними етапами роботи прикордонної станції.

Технологічний графік обробки вантажного поїзда на прикордонній станції

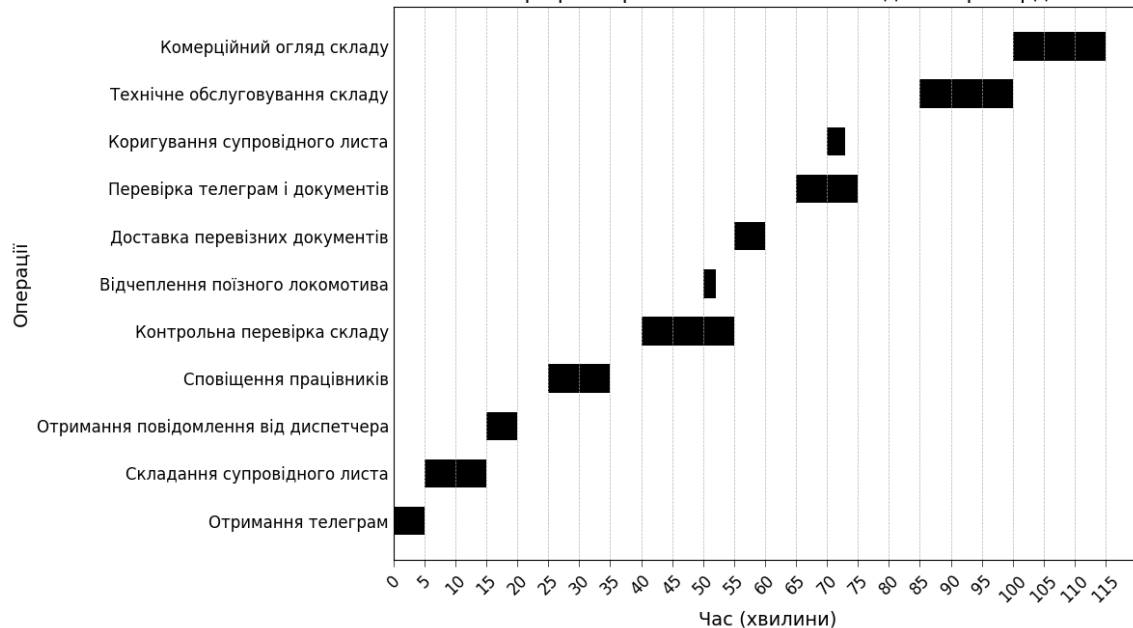


Рис. 1. Технологічний графік обробки вантажного поїзда

на прикордонній станції

Розроблення універсальної моделі для оптимізації управлінських процесів.

Управління вагонопотоками є ключовим елементом ефективної роботи залізничного транспорту, зокрема на міжнародних маршрутах [4, 5]. Основний аспект цього завдання – забезпечення безперебійного, швидкого та ефективного руху вантажних поїздів між різними країнами, ураховуючи обмеження інфраструктури, митні процедури, час обробки вантажів і локомотивів, а також інші специфічні фактори. Для досягнення цієї мети необхідне розроблення універсальної моделі з урахування численних змінних і оптимізації процесів управління.

Основні фактори, що впливають на ефективність руху вагонів:

1. Технічні обмеження інфраструктури.

Пропускна спроможність залізничних станцій, особливо прикордонних, визначає швидкість обробки поїздів. Мережі, що межують між різними країнами, часто мають різні стандарти колії, швидкості і типи локомотивів. Зміна локомотивів або обмеження на швидкість руху впливають на загальний час транспортування.

2. Митні процедури та документообіг.

Важливими є митні процедури та перевірки на прикордонних станціях. Поїзди можуть бути затримані, що впливає на загальний час обробки вантажів. Важливим є прогнозування часу митного оформлення та оптимізація таких операцій.

3. Координація між різними транспортними системами.

Узгодження графіків руху, обробка документів і контроль на прикордонних станціях потребують чіткої взаємодії різних залізничних адміністрацій і митних органів.

4. Випадкові фактори та непередбачувані затримки.

Технічні неполадки, погодні умови, затори на станціях або помилки в документообігу спричиняють затримки, що впливають на ефективність. Модель має враховувати такі ситуації.

5. Формування цільової функції.

Оптимізація управління передбачає максимізацію ефективності системи, ураховуючи витрати вагоногодин, використання локомотивів, час простою, витрати пального та інших ресурсів:

$$\max F = w_1 \cdot \frac{1}{Z_{\text{ваг}}} + w_2 \cdot \frac{1}{Z_{\text{лок}}} + w_3 \cdot \frac{1}{T_{\text{простій}}} - w_4 \cdot C_{\text{паливо}} \quad (1)$$

$$Z_{\text{ваг}} = \sum_i (T_{\text{пр. } i} \cdot V_i)$$

$$Z_{\text{лок}} = \sum_i (T_{\text{лок}} \cdot N_{\text{лок}})$$

$$T_{\text{простій}} = \sum_i T_{\text{пр. } i}$$

$$C_{\text{паливо}} = \sum_k (L_k \cdot P_k)$$

де $Z_{\text{ваг}}$ – загальні витрати вагоногодин;

$Z_{\text{лок}}$ – витрати часу роботи локомотивів;

$T_{\text{простій}}$ – час простою вагонів;

$C_{\text{паливо}}$ – витрати на пальне;

w_1, w_2, w_3, w_4 – вагові коефіцієнти, що задають пріоритети.

Далі наведені обмеження для розробленої цільової функції (1).

Баланс вагонів на прикордонній станції:

$$\sum_j R_{ij} + V_i = O_i + S_i,$$

де O_i – вагони, відправлені з прикордонної станції i ;

S_i – залишок вагонів на станції.

Час роботи локомотивної бригади

$$T_{\text{лок}} \leq T_{\text{доп.}}$$

Пропускна спроможність станції

$$V_i \leq C_{\text{макс } i},$$

де $C_{\max i}$ – максимальна кількість вагонів, яку може обробити станція i .

Час простою вагонів

$$T_{\text{пр. } i} = T_{\text{відп. } i} - T_{\text{поч. } i},$$

де $T_{\text{поч } i}$ – час прибуття вагонів;

$T_{\text{відп } i}$ – час їх відправлення.

Ліміт відправлень із технічної станції

$$\sum_j R_{ij} \leq C_{\text{техн. } j},$$

де $C_{\text{техн } j}$ – місткість технічної станції j .

Місткість прикордонної станції

$$S_i + V_i \leq C_{\text{прикордонна } i},$$

де $C_{\text{прикордонна } i}$ – місткість прикордонної станції.

Витрати пального локомотивів

$$C_{\text{паливо}} = \sum_k (L_k \cdot P_k),$$

де P_k – витрати пального на одиницю пробігу;

L_k – пробіг локомотива k .

Урахування реального часу.

Для моделювання динамічних змін використовують t -залежні функції:

$$V_i(t), \quad T_{\text{пр. } i}(t), \quad S_i(t).$$

Прогнозування потоку вагонів ґрунтовано на історичних даних із моніторингом затримок.

Оцінювання ефективності застосування різних математичних підходів для вирішення проблем управління вагонопотоками, зокрема за допомогою сучасних методів прогнозування і оптимізації, подано на рис. 2 у вигляді гістограми порівняння різних математичних підходів, таких як лінійне програмування, генетичні алгоритми та методи прогнозування [1].

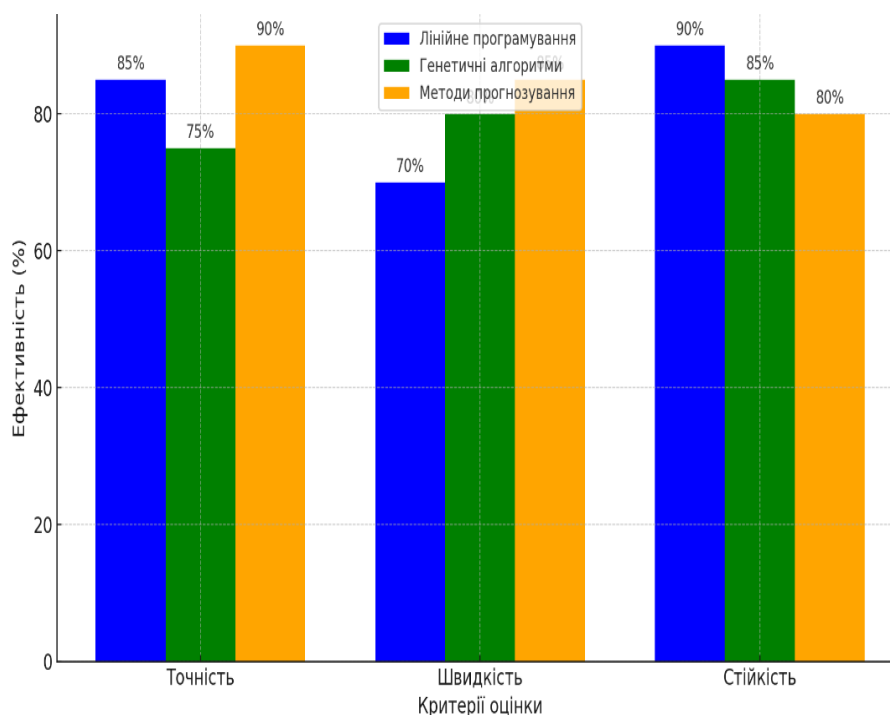


Рис. 2. Гістограма порівняння різних математичних підходів, таких як

лінійне програмування, генетичні алгоритми та методи прогнозування

Для перевірки роботи розробленої цільової функції було використано один із методів оптимізації — лінійне програмування. Мета —

максимізувати значення розробленої цільової функції з урахуванням її компонентів. Результат розрахунку подано як графік на рис. 3.

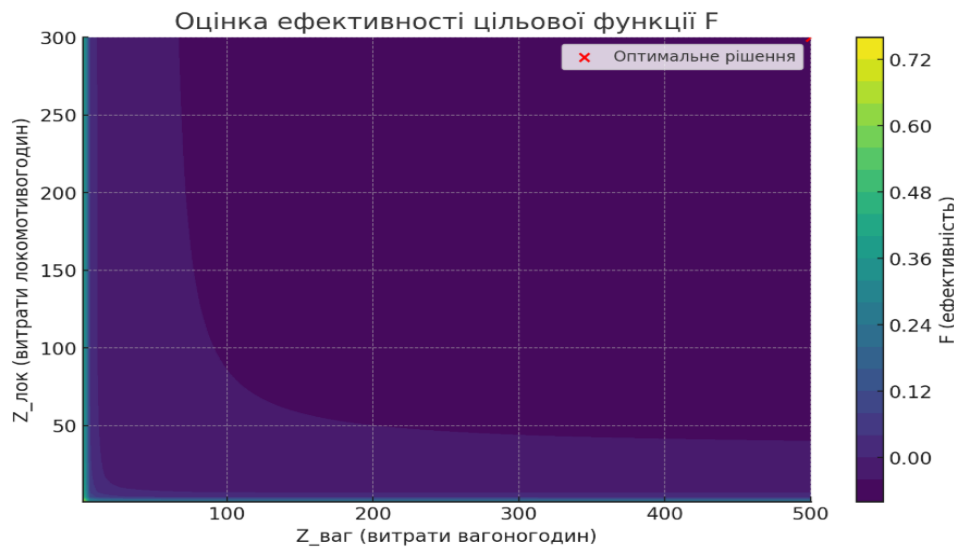


Рис. 3. Оцінювання ефективності розробленої цільової функції

Лінійне програмування виявило оптимальні значення параметрів, які забезпечують максимізацію функції ефективності. Графік ілюструє залежність функції від витрат вагоно- і локомотивогодин. На графіку також позначено оптимальну точку червоним маркером.

Можна зробити висновок, що з використанням лінійного програмування ми досягаємо оптимального розподілу ресурсів для управління вагонопотоками з заданими обмеженнями.

Переваги запропонованої моделі:

- комплексність: урахування всіх головних факторів, що впливають на ефективність вагонопотоків;
- гнучкість: можливість адаптації до змін режимів роботи станцій і міжнародних маршрутів;
- автоматизація: інтеграція з інформаційними системами для моніторингу та оптимізації в реальному часі.

Ця модель може бути застосована для аналізу технологічного графіка обробки вантажного поїзда, що дає змогу візуалізувати взаємозв'язок між різними операціями. Технологічний графік стане частиною аналітичного інструментарію для оцінювання ефективності управління на прикордонних станціях, а також ухвалення рішень з оптимізації ресурсів і часу.

Також до переваг цієї моделі можна віднести зниження затримок, покращення використання інфраструктури, оптимізацію

маршрутів, скорочення витрат на паливе, покращення координації, взаємодію між різними адміністраціями та органами контролю.

Розроблена універсальна модель є важливим інструментом для підвищення ефективності міжнародних залізничних перевезень, оптимізації використання ресурсів і забезпечення надійності логістичних процесів.

Для ефективного управління вагонопотоками необхідно враховувати кілька головних аспектів. Технічна інфраструктура обмежена пропускнуною спроможністю станцій, різницею в стандартах колії і станом обладнання. Доцільно модернізувати інфраструктуру, використовувати багатосистемні локомотиви та регулярно обслуговувати техніку.

Митні процедури часто викликають затримки через повільний документообіг і тривалі перевірки. Для їх покращення слід упроваджувати цифрові системи документообігу, спростувати процедури та застосовувати сучасні технології.

Координація між транспортними системами ускладнена через відсутність єдиного графіка руху і недостатню інтеграцію інформаційних систем. Важливо забезпечити централізоване управління та інтеграцію даних для кращої синхронізації.

Непередбачувані фактори, такі як погодні умови, аварії та помилки, потребують ефективного управління ризиками, прогнозування затримок і підвищення кваліфікації персоналу.

Економічні аспекти, зокрема зростання витрат на ресурси, потребують оптимізації витрат і залучення державної підтримки. Технологічні

можливості, зокрема автоматизація і штучний інтелект, створюють умови для кращого моніторингу та управління.

Висновки.

Оптимізація управління вагонопотоками є важливим завданням залізничної галузі для підвищення ефективності транспортної системи. Дослідження аналізує математичні підходи, які допомагають мінімізувати витрати часу, ресурсів і пального, водночас забезпечуючи продуктивність.

Математичні моделі, такі як лінійне програмування і генетичні алгоритми, сприяють оптимізації розподілу вагонів і зменшенню простоїв. На ефективність управління впливають технічний стан інфраструктури, цифровізація і координація між системами. Використання автоматизації, штучного інтелекту і аналізу даних підвищує точність прогнозів і допомагає уникати затримок.

Загалом дослідження підкреслює важливість системного підходу для управління вагонопотоками з урахуванням сучасних технологій і математичних методів. Реалізація запропонованих підходів і рекомендацій дасть змогу не лише покращити ефективність роботи залізничної галузі, але й створити фундамент для її сталого розвитку в умовах зростаючих транспортних потреб.

Список використаних джерел

1. Modeling and Optimization of International Rail Freight Transport Flows Using Linear Programming / J. Novak et al. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*. 2020. Vol. 136. P. 101922. URL: <https://doi.org/10.1016/j.tre.2020.101922> (date of access: 10.11.2024).
2. Digital Technologies for Cross-Border Railway Operations Management / M. Bergmann et al. *Procedia Computer Science*. 2021. Vol. 181. P. 563–570. URL: <https://doi.org/10.1016/j.procs.2021.02.154> (date of access: 10.11.2024).
3. Optimization Approaches for Rail Freight Transport: Addressing Border Delays / T. Rodrigues et al. *Journal of Rail Transport Planning & Management*. 2019. Vol. 9. No. 2. P. 72–83. URL: <https://doi.org/10.1016/j.jrtpm.2018.12.002> (date of access: 10.11.2024).
4. Impact of Infrastructure Constraints on International Freight Rail Transport / F. Chen et al. *Transportation Research Procedia*. 2022. Vol. 63. P. 350–359. URL: <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2022.06.042> (date of access: 10.11.2024).
5. The Role of Machine Learning in Railway Traffic Flow Optimization / K. Müller et al. *Expert Systems with Applications*. 2023. Vol. 209. P. 118092. URL: <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2023.118092> (date of access: 10.11.2024).
6. Рибальченко Л. І. Визначення цільової функції оптимізації використання порожнього парку вагонів. *Восточно-Европейский журнал передовых технологий*. 2012. Вип. 6/3 (60). С. 25-27.
7. Рибальченко Л. І., Франковський Д. В. Оптимізація використання порожніх вагонів в умовах дефіциту рухомого складу. *Зб. наук. праць УкрДАЗТ*. Харків: УкрДАЗТ, 2014. Вип. 145. С. 69-72.

Rybalchenko Liliia

MANAGEMENT OF WAGON FLOWS ON INTERNATIONAL RAILWAY ROUTES AND WAYS TO IMPROVE EFFICIENCY

Abstract. The optimization of wagon flows is a critical objective for the railway industry, particularly in the context of increasing demands for transport efficiency. This study explores mathematical approaches to modeling and optimizing wagon flows to minimize time, resource, and fuel consumption while maintaining high system productivity.

The research highlights the efficacy of advanced mathematical models such as linear programming, genetic algorithms, and predictive modeling in achieving optimal wagon allocation, reducing idle times, and enhancing locomotive performance. These approaches are shown to be effective tools for addressing complex challenges in wagon flow management.

Key factors affecting wagon flow management are identified, including the technical condition of infrastructure, integration of information systems, weather conditions, documentation speed, and economic constraints. By addressing these factors through the adoption of modern technologies and enhanced coordination between transportation systems, their negative impacts can be mitigated.

The study underscores the critical role of digitalization in streamlining wagon operations. The integration of automated management systems and digital platforms for data monitoring and analytics improves decision-making speed and accuracy. Technologies such as artificial intelligence, machine learning, and big data analysis enable real-time prediction of delays and optimization of routes, enhancing the resilience and adaptability of the transportation system.

Practical recommendations are provided to improve wagon flow management. These include investing in infrastructure modernization, fostering

international cooperation, integrating advanced information systems, and adopting environmentally sustainable and energy-efficient technologies. These measures aim to boost the efficiency of railway operations and lay the groundwork for sustainable development in the face of growing transportation needs.

The findings emphasize the importance of a systematic approach to wagon flow management, leveraging modern technologies and mathematical methodologies. Implementing these approaches and recommendations will not only improve the efficiency of the railway sector but also support its sustainable growth by addressing contemporary challenges in transportation. This study offers a comprehensive framework for optimizing wagon flows, contributing to the broader objective of enhancing global transport systems.

Keywords: wagon flow management; rail logistics optimization; border station capacity; train schedule planning; rail freight transportation; international transport corridors; integration of information systems into rail transport; wagon flow processing; freight train movement optimization; railway operations modeling.

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>.

Канд. техн. наук ПАТЛАСОВ О.М., аспіранти ФІЛІП'ЄВ О.О.,
ВОРОНЦОВ Я.С.

Щодо параметрів залізничної колії, що забезпечують плавність і безпеку руху в межах залізничних переїздів

Анотація. Зі збільшенням ширини колії (особливо у кривих ділянках) до максимально допустимих значень з'являється небезпека удару гребеня колеса об відвід контррейки, яка конструктивно забезпечує необхідний жолоб у настилі залізничного переїзду. Для забезпечення комфортабельності та безпеки руху необхідно за встановлених швидкостей обмежити максимально допустиму ширину колії або змінити мінімальний розмір жолоба в залізничному переїзді, або зменшити максимальну швидкість руху. Ці висновки актуальні для залізниць ширини колії 1520 і 1435 мм.

Ключові слова: залізничний переїзд, настил, контррейка, жолоб, безпека руху, комфортабельність.

Вступ.

В Україні розвинена мережа автомобільних доріг і залізниць. Не зважаючи на те, що на ділянках швидкісного та інтенсивного руху поїздів існує тенденція влаштування шляхопроводів, ще багато ділянок залізниць, де автомобільні дороги перетинають залізничні колії в одному рівні. Для забезпечення пересічення залізниць автомобільними дорогами в одному рівні необхідно влаштовувати залізничні переїзди [1-3]. Залізничні переїзди – це зона підвищеної небезпеки для залізничного та автомобільного транспорту. Постійні прагнення залізничників до підвищення швидкості руху поїздів потребують більшої уваги щодо влаштування та утримання інфраструктури і рухомого складу залізниць.

Аналіз останніх досліджень і публікацій.

До останнього часу досліджували нерівності колії в межах залізничних переїздів [4] і визначали вплив нерівностей колії на залізничних переїздах на умови взаємодії колії й рухомого складу [5]. Дослідники зазначали, що в зоні переїзду виникають вертикальні і горизонтальні нерівності колії, локальні зміни жорсткості колії, які впливають на умови взаємодії колії та рухомого складу, плавність руху і комфортабельність їзди, а за збільшенням швидкості руху з одночасним зростанням нерівностей колії в профілі і плані в зоні переїздів виникає загроза безпеці руху поїздів.

При цьому дослідники з питань параметрів ширини колії та жолобів у межах переїздів практично не торкалися.

Визначення мети та завдання дослідження.

Метою цього дослідження є удосконалення параметрів улаштування та умов утримання колії в межах

залізничних переїздів шляхом використанням розрахунково-аналітичного методу, що ґрунтується на аналізі нормативної документації та на проведенні розрахунків, які забезпечують вимоги інтероперабельності інфраструктури і рухомого складу.

Основна частина дослідження.

Технічний стан залізничної колії має безпосередній вплив на безпеку та комфорт руху. При цьому за високих швидкостей руху навіть невеликі відхилення від норм утримання залізничної колії мають вплив на комфортабельність і безпеку руху. Особливо це відчувається у кривих ділянках колії, де конструкцією передбачені зміни в улаштуванні та утриманні колії. Але навіть за існуючих параметрів колії та рухомого складу, встановлених на сьогодні, у певних випадках не виключена можливість зростання динамічних сил взаємодії колії та рухомого складу.

Одним із таких випадків є конструкція та параметри залізничних переїздів.

© ПАТЛАСОВ О.М., ФІЛІП'ЄВ О.О., ВОРОНЦОВ Я.С. 2024

Так, внаслідок збільшення ширини колії до гранично допустимих значень з'являється небезпека удару неробочої частини гребеня колеса об відвід контррейки, вкладеної в настилі переїзду для утворення жолобу, що призведе до порушення комфортабельності та безпеки руху.

Відповідно до Правил технічної експлуатації залізниць України, затверджених наказом МТУ від 20.12.1996 р. № 411, зареєстрованих в МЮУ 25.02.1997 р. за № 50/1854 зі змінами і доповненнями (ПТЕ) [1] та Інструкції з улаштування та утримання колії залізниць України [3] у прямих ділянках колії передбачена ширина між головками рейок 1520 мм. Але у кривих ділянках колії для вільного вписування в них коліс рухомого складу передбачено збільшувати ширину колії залежно від радіуса кривої до 1535 мм (на залізобетонних шпалах) і до 1540 мм (на дерев'яних шпалах). При цьому ще є допуски в утриманні колії залежно від швидкості руху рухомого складу. Отже, найбільша допустима ширина колії може досягати 1548 мм (за норми ширини колії 1435 мм максимально допустима ширина колії може досягати 1470 мм [6]).

Відповідно до ПТЕ [1] та Інструкції з улаштування та експлуатації залізничних переїздів [2] для пересічення залізниць з автодорогами в одному рівні влаштовують залізничні переїзди. Для забезпечення безперешкодного проходження гребенів (реборд) коліс рухомого складу залізничного транспорту в межах настилу залізничного переїзду вкладають контррейки, спеціальні бруси, інші пристосування, при цьому відповідно до чинних нормативних документів [2, 6] ширину жолоба влаштовують від 75 до 110 мм.

Утримуючи ширину колії в межах максимально допустимих розмірів (1548 або 1470 мм), мінімального розміру жолоба залізничного переїзду (75 мм) та експлуатації

колісних пар рухомого складу з мінімально допустимими розмірами насадки коліс на вісь (1437 мм [1], 1357 мм [7]) і товщиною гребеня колеса (25 мм [1], 22 мм [7]) є вірогідність за настання певних умов, що гребінь колеса може ударити об відвід контррейки жолоба залізничного переїзду (рис. 1). Цей висновок про удар гребеня колеса об відвід контррейки жолоба залізничного переїзду можна зробити виходячи з деяких положень. Максимальна відстань $L_{к\max}$ між робочою гранню рейки з одного боку до робочої грані контррейки з іншого боку колії становить

$$L_{к\max} = S_{к\max} - l_{ж\min},$$

де $l_{ж\min}$ – мінімальний розмір ширини жолоба;
 $S_{к\max}$ – максимально допустимий розмір ширини колії.

Тобто

$$L_{к\max} = 1548 - 75 = 1473 \text{ мм (для ширини колії 1520 мм),}$$

$$L_{к\max} = 1470 - 75 = 1395 \text{ мм (для ширини колії 1435 мм).}$$

При цьому мінімальна відстань $L_{кп\min}$ від робочої грані гребеня колісної пари з одного боку до неробочої грані гребеня колісної пари з іншого боку становитиме

$$L_{кп\min} = l_{кп\min} + h_{гр\min},$$

де $l_{кп\min}$ – мінімальна відстань між внутрішніми гранями гребенів коліс;

$h_{гр\min}$ – мінімальний розмір товщини гребеня.

Тобто

$$L_{кп\min} = 1437 + 25 = 1462 \text{ мм (для ширини колії 1520 мм),}$$

$$L_{кп\min} = 1357 + 22 = 1379 \text{ мм (для ширини колії 1435 мм).}$$

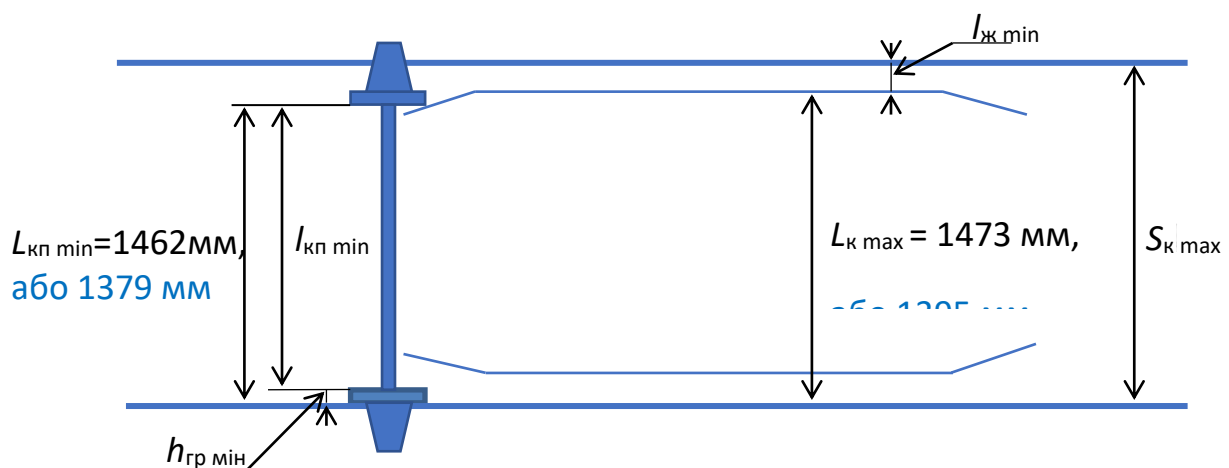


Рис. 1. Конструктивна схема переїзду

За найбільш несприятливих умов (розміри, допустимі чинними нормативними документами) відстань між робочою гранню гребеня колісної пари з одного боку до неробочої грані гребеня колісної пари з іншого боку на 11 мм (за норми ширини колії 1520 мм) або 16 мм (за норми ширини колії 1435 мм) менше, ніж відстань між робочою гранню рейки з одного боку до робочої грані контррейки з іншого боку колії. Тобто якщо гребінь одного колеса колісної пари щільно притискається до робочої рейки (що зазвичай відбувається з вписуванням у криві ділянки колії), то з іншого боку гребінь колісної пари може неробочою гранню ударити об відвід контррейки з подальшим динамічним направленням колісної пари в жолоб настилу переїзду або вкочуванням гребеня колеса на контррейку, що призведе до погіршень плавності та безпеки руху. Зі збільшенням швидкості руху сила такого удару, безумовно, підвищуватиметься, а комфортабельність погіршуватиметься.

Розрахунок наведено для визначених нормативними документами граничних розмірів (з урахуванням допусків) ширини колії та колісної пари. У реальній експлуатації різниця може бути ще більше за рахунок пружної деформації колії (розширення) і колісної пари (зменшення відповідної відстані за рахунок вигину осі колісної пари).

З метою недопущення ударів гребеня колеса об відвід контррейки необхідно створити такі умови, щоб максимальна ширина колії була менше суми мінімально допустимих розмірів насадки коліс на вісь, товщини гребеня колеса і жолоба залізничного переїзду.

$$S_{k\max} < l_{kp\min} + h_{gr\min} + l_{j\min}.$$

Для зазначених мінімальних розмірів колісної пари та жолоба переїзду максимальна ширина колії в межах переїзного настилу має бути

менше 1537 мм (за норми ширини колії 1520 мм) і 1454 мм (за норми ширини колії 1435 мм).

Якщо не обмежувати максимально допустиму ширину колії 1548 (1470) мм у межах залізничного переїзду, то для виключення ударів гребеня колеса об відвід контррейки необхідно змінити один із мінімальних параметрів колісної пари чи жолоба переїзду. Наприклад, мінімальний жолоб переїзду має бути більше різниці максимальної ширини колії і мінімально допустимих розмірів насадки коліс на вісь і товщини гребеня колеса.

$$l_{j\min} > S_{k\max} - l_{kp\min} - h_{gr\min}.$$

Для зазначених максимальної ширини колії і мінімальних розмірів колісної пари мінімальний розмір жолоба має бути більше 86 мм (за норми ширини колії 1520 мм) або 91 мм (за норми ширини колії 1435 мм).

Для випадку, коли відбувається взаємодія неробочої грані гребеня колеса з відводом контррейки, необхідно враховувати динаміко-кінематичний критерій. Фізичне значення цього критерію – недопущення різних зсувів колісних пар. Кількісне вираження цього критерію є параметром, пов'язаним із втратою кінетичної енергії з набіганням колеса на контррейку (рис. 2). Критерій обмежує кути відгину відведеної частини контррейки залежно від конструкційної швидкості руху.

Конструктивно контррейки складаються з основної частини l_{ko} , яка дорівнює ширині переїзду та двох відводів l_k , що направляють колісні пари в жолоб контррейки. Контррейка утворює жолоб із робочою рейкою розміром h_{ko} у межах настилу переїзду. Для направлення гребеня колісної пари в жолоб робиться відвід на кінці контррейки довжиною l_k із кутом α на відстань h_k від робочої грані рейки колії.

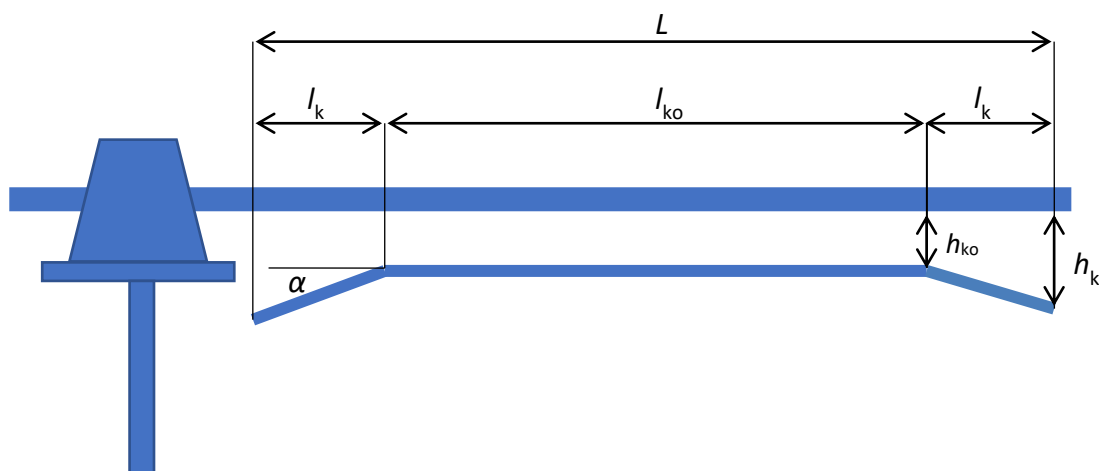


Рис. 2. Конструктивна схема контррейки переїзду

Кут відводу контррейки не має перевищувати допустимий кут удару об відведену частину контррейки, що визначають як допустиму величину втрат кінетичної енергії («ефекту удару») за формулою [9]

$$\sin \alpha = \frac{W}{V},$$

де W – допустима величина втрат кінетичної енергії для контррейок;

V – розрахункова (встановлена) швидкість руху в межах переїзду.

Допустиму величину втрат кінетичної енергії для контррейок у жолобах переїздів можна прийняти такою, що відповідає сучасній конструкції контррейок на стрілочних переводах [8] (рис. 3).

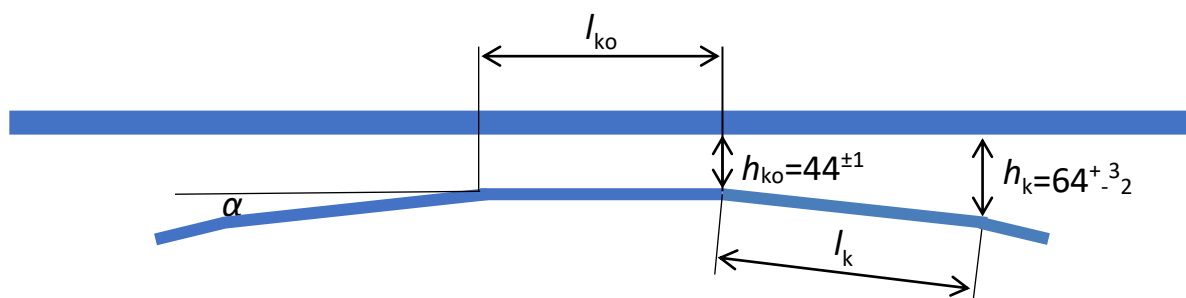


Рис. 3. Конструктивна схема контррейки на стрілочному переводі

Максимальна різниця між відстанями прямої та відігнутої частини може досягати 24 мм [8]. Допустиму величину втрат кінетичної енергії визначають за формулою

$$W = V \sin \alpha.$$

Для контррейки стрілочного переводу марки 1/11 і рейок Р65 довжина відігнутої частини

складає 1476 мм. За встановленої максимальної швидкості руху 140 км/год допустима величина втрат кінетичної енергії дорівнюватиме 0,6 м/с.

З останньої формули можна зробити висновок, що з набіганням коліс на відведену частину контррейки параметр W , що характеризує передавання енергії від коліс на контррейку стрілочного перевodu чи переїзду, зростає пропорційно синусу кута, під яким відвід контррейки відхиляється від лінії, паралельній робочій рейці колії.

На залізничних переїздах з існуючими (більшими) кутами відводів контррейок для неперевикнення допустимої величини втрат кінетичної енергії залежно від кута відгину контррейки визначають максимальну допустиму швидкість руху в межах настилу залізничного переїзду як

$$V_{max} = \frac{W}{\sin \alpha}.$$

Також треба врахувати і оцінити різні конструкції переїзних настилів. З вкладанням переїзних плит із залізобетону чи гумокордового покриття контррейки не вкладають, а жолоб роблять за рахунок спеціальних брусів чи гумокорду. Відповідно і відсутні відводи для направлення колісних пар, що, безумовно, для комфортабельності їзди потребує обмеження швидкості чи максимальної ширини колії через можливість удару гребеня колеса об елементи переїзного настилу.

Висновки.

Для забезпечення комфортабельності їзди пасажирів і безпеки руху зі встановленими швидкостями необхідно обмежити максимально допустиму ширину колії в межах залізничних переїздів або змінити мінімальний розмір жолоба в залізничному переїзді. Якщо не змінювати зазначені параметри, то пропонується обмежувати швидкість руху поїздів за параметром втрат кінетичної енергії. Ці висновки актуальні для залізниць із нормами ширини колії 1520 і 1435 мм. Відповідні зміни необхідно додати до чинних нормативних документів, що регламентують параметри влаштування та умови експлуатації залізничних переїздів.

Список використаних джерел

1. Правила технічної експлуатації залізниць України : затв. наказом МТУ від 20.12.1996 р. № 411, зареєстр. в МЮУ 25.02.1997 р. за № 50/1854 зі змінами і доповненнями.

Офіційний портал Верховної Ради України. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0050-97#Text> (дата звернення 05.11.2024).

2. Інструкція з улаштування та експлуатації залізничних переїздів ЦП-0174 : затв. наказом МТЗУ від 26.01.2007 р. № 54, зареєстр. в МЮУ 22.02.2007 р. за № 162/13429 зі змінами і доповненнями. Офіційний портал Верховної Ради України. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0162-07#Text> (дата звернення 05.11.2024).

3. Інструкція з улаштування та утримання колії залізниць України. Київ : ТОВ «НВП Поліграфсервіс», 2012. 456 с.

4. Курган М. Б., Курган Д. М., Лужицький О. Ф. Дослідження нерівностей колії в межах залізничних переїздів. *Наука та прогрес транспорту. Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна*. 2015. № 5. С. 84-96. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/vdnuzt_2015_5_10 (дата звернення 05.11.2024).

5. Курган Д. М., Лужицький О. Ф., Гаврилов М. О., Панченко П. В. Вплив нерівностей колії на залізничних переїздах на умови взаємодії колії й рухомого складу. *Матеріали 80 Міжнародної науково-практичної конференції «Проблеми та перспективи розвитку залізничного транспорту»*. Дніпро, 2020. С. 155-156. URL: https://reposit.nupp.edu.ua/bitstream/PolNTU/8655/1/80_international_SP_conference_PPRTD.pdf#page=156 (дата звернення 05.11.2024).

6. СТП 02.01-002:2023. Залізничні колії / Улаштування й утримання колії шириною 1435 мм та суміщеної залізничної колії (1520 і 1435 мм). Київ : АТ «УКРЗАЛІЗНИЦЯ», 2023. 49 с.

7. Договор о пользовании грузовыми вагонами в международном сообщении / Договор о ПГВ. Офиц. изд. Варшава : Комитет ОСЖД, 2022. 162 с.

8. ГОСТ 28370-89. Межгосударственный стандарт / Крестовины сборные марок 1/11 и 1/9. Основные размеры. Введ. 01.07.90. Москва: Издательство стандартов, 1990. 6 с.

9. Даніленко Е. І. Залізнична колія / Улаштування, проектування і розрахунки, взаємодія з рухомим складом. Київ : Інпрес, 2010. Т. 1. 528 с.

O. Patlasov, O. Filipiev, Ya. Voroncov
CONCERNING THE PARAMETERS OF THE
RAILWAY TRACK THAT ENSURE THE
SMOOTHNESS AND SAFETY OF TRAFFIC
WITHIN RAILWAY CROSSINGS

Abstract. The technical condition of the railway track has a direct impact on the safety and

comfort of movement. At the same time, at high speeds, even small deviations from the standards of railway track maintenance have an impact on the comfort and safety of traffic. This is especially felt in the curved sections of the track, where the design foresees changes in the arrangement and maintenance of the track. But even with the existing parameters of the track and rolling stock, which are currently established, in certain cases, the possibility of an increase in the dynamic forces of interaction between the track and rolling stock is not excluded.

One of these cases is the construction and parameters of railway crossings. Thus, as a result of increasing the width of the track to the maximum allowable values, there is a danger of the non-working part of the wheel crest hitting the lead of the counter rail, which is inserted into the gutter of the crossing floor, which will lead to a violation of the comfort and safety of movement.

Under the most unfavorable conditions (dimensions allowed by current regulatory documents), the distance between the working face of the wheel pair crest on one side and the non-working face of the wheel pair crest on the other side is 11 mm (at the standard track width of 1520 mm) or 16 mm (at the standard track width 1435 mm) less than the distance between the working face of the rail on one side to the working face of the counter rail on the other side of the track. That is, if the crest of one wheel of a wheel pair is tightly pressed against the rail (which constantly happens when fitting into the curves of the track), then on the other hand, the crest of the wheel pair can hit the counter rail with its idle face, with further dynamic direction of the wheel pair into the trough of the crossing floor or rolling the ridge of the wheel on the counterrail, which will lead to deterioration of the smoothness and safety of movement. When the speed of movement increases, the force of such an impact will definitely increase, and the comfort level will deteriorate.

For the case when there is an interaction of the non-working face of the wheel ridge with the counterrail branch, the dynamic and kinematic criterion must be taken into account. The meaning of this criterion is the prevention of sharp shifts of wheel pairs. The quantitative expression of this criterion is a parameter related to the loss of kinetic energy when the wheel hits the counterrail. The criterion limits the bending angles of the deflected part of the counterrail depending on the design speed of movement.

It is also necessary to take into account and evaluate different designs of crossing floors. When laying crossing slabs made of reinforced concrete or rubber cord covering, counter rails are not inserted, and the gutter is made at the expense of special bars or rubber cord. Accordingly, there are no taps for directing wheel pairs, which definitely requires a speed limit for the comfort of driving due to the

possibility of the wheel crest hitting the elements of the road surface.

Thus, in order to ensure the comfort of passengers and the safety of traffic at the set speeds, it is necessary to limit the maximum permissible width of the track within railway crossings or to change the minimum size of the gutter at a railway crossing. If the specified parameters are not changed, then it is proposed to limit the speed of trains according to the parameter of kinetic energy loss. These conclusions are relevant for railways both with the norm of track width of 1520 mm and with the norm of 1435 mm.

Keywords: railway crossing, flooring, counter rail, gutter, traffic safety, comfort.

Патласов Олександр Михайлович, кандидат технічних наук, директор навчально-наукового центру розвитку професійної освіти кафедри транспортної інфраструктури, Український державний університет науки і технологій. ORCID iD: 0000-0003-2081-5648. Тел.: +38 (050) 575-89-21. E-mail: o.m.patlasov@ust.edu.ua.

Філіп'єв Олексій Олексійович, аспірант кафедри транспортної інфраструктури, Український державний університет науки і технологій, помічник директора з безпеки руху регіональної філії «Придніпровська залізниця» АТ «Укрзалізниця». ORCID iD: 0009-0001-0278-5353. Тел.: +38 (095) 363-42-48. E-mail: afil@ukr.net.

Воронцов Ярослав Сергійович, аспірант, спеціальність 275 «Транспортні технології», Державний університет інфраструктури та технологій, вул Кирилівська, 9, м. Київ, Україна. E-mail: 04071voroncov.yaroslav@gmail.com. Тел.: +38-093-253-55-33. ORCID <https://orcid.org/0009-0000-8178-5468>.

Patlasov Oleksandr, PhD (Tech), director of the educational and scientific center for the development of professional education of the department of transport infrastructure, Ukrainian State University of Science and Technologies. ORCID iD: 0000-0003-2081-5648.

Tel.: +38 (050) 575-89-21. E-mail: o.m.patlasov@ust.edu.ua.

Filipiev Oleksii, postgraduate student, department of transport infrastructure, Ukrainian State University of Science and Technologies. ORCID iD: 0009-0001-0278-5353. Tel.: +38 (095) 363-42-48. E-mail: afil@ukr.net.

Vorontsov Yaroslav S., PhD student, specialty 275 «Transportation Technologies», State University of Infrastructure and Technology, 9 Kyrylivska St., Kyiv, Ukraine, 04071. Tel.: +38-093-253-55-33. ORCID <https://orcid.org/0009-0000-8178-5468>. E-mail: voroncov.yaroslav@gmail.com.

