



  
**УкрДУЗТ**  
Український державний університет залізничного транспорту

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

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

№4 2023 р.

4 (155)' 2023

**ІНФОРМАЦІЙНО - КЕРУЮЧІ  
СИСТЕМИ НА ЗАЛІЗНИЧНОМУ  
ТРАНСПОРТІ**

Виходить 4 рази на рік

Видається з 23 квітня 1996 р.

**INFORMACIJSNO-KERUJUCHI  
SYSTEMY NA ZALIZNYCHNOMU  
TRANSPORTI**

**Зміст – Содержание – Contents**

**Видання**

Українського державного  
університету залізничного  
транспорту



КАРГІН А. О., ПЕТРЕНКО Т. Г., ГІЄВСЬКИЙ Д. О.  
**Автономні інтелектуальні безлюдні системи:  
методи та моделі управління, що задовольняють  
критерій автономності**

..... 3

ПАНЧЕНКО С. В., БУНЧУКОВ О. А., СОТНИК В. О.  
**Аналіз проєктних рішень мікропроцесорної  
системи рейкових кіл**

..... 19

АНАНЬЄВА О. М., БАБАЄВ М. М., ДАВИДЕНКО  
М. Г., ПАНЧЕНКО В. В.  
**Частотна локалізація та оцінювання параметрів  
сигналу тестування обмотки статора трифазного  
асинхронного двигуна**

..... 28

БУТЬКО Т. В., ПАРХОМЕНКО Л. О., АРТЕМОВ Є.  
М., ЛАГНО О. С.  
**Методи організації вантажних залізничних  
перевезень на основі ризик-орієнтованих технологій**

.....38

<b>ЛЯШЕНКО В. М., ЯЦЬКО С. І., ПЛАХТІЙ О. А.</b> <b>Досвід застосування mca при виборі заходів з енергозбереження на рейковому електричному транспорті</b> .....	46
<b>КИРИЧЕНКО О. М, РАКІВНЕНКО В. П., КОЛІСНИК А. В.</b> <b>Графоаналітичний підхід до визначення працездатності ходової частини важких транспортних агрегатів через систему колесо-рейка</b> .....	55
<b>СИТНИК Б. Т., МІРОШНИК А. М</b> <b>Структурно-параметрична індексна ідентифікація в адаптивних системах управління рухомими об'єктами</b> .....	64
<b>ПРОДАЩУК С. М., ШАПАТІНА О. О., ТРОЯН Д. О., КВАСОВ П. В., ЛЯШКО Ю. А.</b> <b>Удосконалення технології переробки контейнерів у сучасних умовах</b> .....	71
<b>КРАШЕНІНІН О.С., ШАПАТІНА О.О., КАЛИТИНСЬКА М.О., ЛИХОЛІТ Я.В., ГАЛЮК Р.М.</b> <b>Обґрунтування стратегії організації ремонту локомотивів на основі наявних ресурсів</b> .....	78
<b>ПУЗИР В.Г., ОБОЗНИЙ О.М.</b> <b>Вплив системи охолодження на енергетичні показники тягового генератора</b> .....	86
<b>СЕРІКОВ Я.О., КОСТИРКІН О.В., БРУСЕНЦОВ В.Г.</b> <b>Менеджмент системи «диспетчер служби залізничного транспорту – виробниче середовище» на основі ідеології систем і системного аналізу</b> .....	90

УДК 004.81:004.383.8

DOI: 10.18664/iksz.t.v28i4.296391

КАРГІН А. О., д-р техн. наук, професор (Український державний університет залізничного транспорту),

ПЕТРЕНКО Т. Г., канд. техн. наук, доцент (Український державний університет залізничного транспорту),

ГІЄВСЬКИЙ Д. О., аспірант (Український державний університет залізничного транспорту)

## Автономні інтелектуальні безлюдні системи: методи та моделі управління, що задовольняють критерій автономності

*При створенні нових поколінь безлюдних систем (БС) основна увага приділяється проблемі підвищення їхнього рівня автономності. Застосування штучного інтелекту (ШІ) для завдань управління БС у невпорядкованому оточенні є одним із напрямів підвищення їхнього рівня автономності. Сьогодні є актуальним створення третього покоління ШІ для врахування особливостей завдань управління в автономних інтелектуальних БС (АІБС). Управління в АІБС є процесом підтримки реалізації плану дій у реальному часі, на кожному етапі плану приймається рішення з урахуванням поточного стану виконання плану, поточної ситуації та можливості виконати частину плану дій, що залишилася, для досягнення мети. У статті розглянуто методи програмного управління та методи управління на основі знань у вигляді правил. Наведено структуру багатошарової розподіленої нечіткої логічної системи (НЛС), що включає множини незалежних локальних НЛС з традиційними лінгвістичними змінними (ЛЗ) і факти з контекстної пам'яті. Розглянуто модифікований механізм нечіткого виведення, який завдяки введенню нечіткого фактора впевненості отримав можливість уніфіковано обробляти як ЛЗ, так і факти. Наведено приклад застосування НЛС в АІБС і результати комп'ютерних експериментів з колісним роботом.*

**Ключові слова:** штучний інтелект, автономна інтелектуальна безлюдна система, нечітка логічна система, управління планом реалізації дій.

### Вступ.

При створенні нових поколінь безпілотних автомобілів [1], автономних апаратів військового призначення [2] та інших автономних систем основна увага приділяється проблемі підвищення їхнього рівня автономності [3]. Індустріальні БС компонується з автоматичних ліній і верстатів з числовим програмним управлінням, транспортних систем і роботів [4]. У залізничній галузі створюються БС на базі розумних поїздів [5]. Сьогодні успіхи ШІ зміцнюють впевненість розробників та інвесторів БС вирішити зазначене завдання в найкоротші терміни. Розрізняють три класи БС залежно від рівня автономності: від запрограмованих автоматичних БС та інтелектуальних БС до автономних інтелектуальних БС (АІБС) [4, 6, 7]. Перший тип має обмеження. БС можуть працювати лише як попередньо запрограмовані і не можуть адаптуватися до будь-яких змін навколишнього середовища.

Другий тип має певні можливості сприйняття, прийняття рішень і контролю, а також може налаштовуватися відповідно до змін навколишнього середовища. Останній тип БС має високий рівень

автономності та інтелекту, не поступаючись або навіть перевершуючи людей у багатьох завданнях [8].

Отже, ШІ є важливою складовою БС, що забезпечує автономність. Рівень автономності, забезпечений апаратними ресурсами БС, задає рамки можливостей ШІ для підтримки автономності, і навпаки, від рівня інтелектуальності, забезпеченого технологіями ШІ, залежить рівень автономності прийняття рішень БС. При розробленні інтелектуальної компоненти традиційних інтернет-речей не акцентується увага на наявності цієї залежності. Однак при створенні АІБС це потрібно робити. З урахуванням зазначеної залежності в роботах [7, 9] вводяться три типи моделей штучного інтелекту - механічний, мислячий і ШІ, що відчуває. Механічний ШІ використовується для простих, стандартизованих, повторюваних і рутинних завдань. Мислячий ШІ використовується для складних, систематичних, заснованих на правилах, і чітко визначених завдань. Прикладом цивільного застосування механічного інтелекту є використання сервісних роботів присутності для отримання в режимі «Face to face» консультацій, придбання білетів чи заселення в готелі.

Вони замінюють людину в рутинних і стандартизованих завданнях [10].

Прикладом мислячого штучного інтелекту є чотириногі роботи Boston Dynamics, які добре адаптуються, універсальні та здатні вловлювати особливості живих істот. Щодо ШІ, що відчуває, то зараз у науковому середовищі обговорюються різні аспекти від соціальних наслідків до проєктів архітектури [8, 11].

Критерії автономності мають різне тлумачення залежно від сфери застосування АІБС і часто даються на якісному рівні. Для автономних автомобілів розроблено стандарт, за яким існує шість рівнів автономності [12]. У роботах з автоматизації виробництва пропонується інший погляд на рівні автономності, як і у сфері створення систем інтернету речей обговорюються свої визначення [13, 14]. У цій роботі межі автономності АІБС розглядаються в загальному сенсі, як ступені неупорядкованості предметної сфери, при яких АІБС здатна виконувати свою місію без будь-якого втручання людини.

### Постановка проблеми.

Спочатку розглянемо причини, які порушують автономність управління в АІБС. Виділяють три основні причини [15]: 1) розмірність задачі прийняття рішень. АІБС обробляє мультимодальні дані від великої кількості сенсорів та інших джерел; 2) чіткі межі в просторі прийняття керуючих дій. При чітких межах через неминучі шуми у вхідних даних у прикордонних областях зберігається можливість помилкових дій; 3) особливості процесу управління в БС. Управління в АІБС є процесом підтримки реалізації плану дій, тобто це багатоетапний процес у реальному часі. На кожному етапі приймається рішення з урахуванням поточного стану виконання плану, поточної ситуації та можливості виконати частину плану дій, що залишилася, для досягнення мети.

Усунення вказаних причин дасть змогу поліпшити показник автономності АІБС, тому дослідження моделей, які можуть бути використані для управління реалізаціями плану дій АІБС і задовольняють вимоги щодо рівня автономності прийняття управляючих рішень у неупорядкованому середовищі, є актуальним.

Традиційно при автоматизації управління послідовністю дій обладнання, у тому числі в робототехніці, використовуються моделі програмного управління [16, 17]. Програмне управління з прямими та зворотними зв'язками передбачає жорстке упорядкування середовища, і будь-які непередбачувані зміни викликають аварійні зупинки обладнання. Це є суттєвим обмеженням використання моделей у БС, з точки зору забезпечення автономності управління.

Одним із напрямів подолання зазначеної проблеми є використання ШІ, що породило новий клас БС, відомий як АІБС, який розглянуто в цій роботі. Сьогодні в наукових публікаціях обговорюється широкий спектр моделей ШІ і підходів до інтелектуалізації БС. Актуальний на сьогодні арсенал підходів і моделей ШІ, які можуть бути адаптовані для вирішення завдання, що розглядається, поділений на два напрями: 1) орієнтований на обробку даних від датчиків; 2) орієнтований на обробку знань. Перший включає підходи злиття даних і показань сенсорів: інтелектуальний аналіз даних, вилучення знань із потоків даних, агрегація різнорідних даних [18, 19] і дистиляція знань [15, 20]. Ці моделі можуть бути використані на етапах первинної обробки даних, але для вирішення завдання безпосереднього прийняття рішень та управління вони не призначені. З цієї ж причини важко використовувати «чисті» штучні нейронні мережі для додатків, до яких належить АІБС [21]. Другий підхід, відомий у ШІ як знання-орієнтовані системи, засновані на правилах [21], дає змогу реалізувати завдання прийняття рішень, урахувавши більшість вищевказаних особливостей АІБС. Прийняття рішень у галузях робототехніки, інтернету речей, розумних машин виконує Rules Engine [22]. Він широко використовується у вбудованих системах реального часу, однак проблема узагальнення даних, що підтримується нечіткими логічними системами (НЛС), залишається актуальною. Використання НЛС у «чистому» вигляді є проблематичним через обмежені можливості налаштування нечіткої системи (кількість вхідних змінних не перевищує п'ять-сім) і масштабованість (додавання нових вхідних числових змінних або зміна їхньої кількості чи визначення термінів лінгвістичних змінних потребує зміни існуючої бази знань [23]). Підхід «розділяй і володарюй», що добре зарекомендував себе в перших експертних системах на базі правила продукції [24] щодо зменшення розмірності простору рішень, застосовується і в НЛС [23] для завдань управління. Однак для вищезгаданої моделі управління, що підтримує реалізацію плану дій, застосування підходу «розділяй і володарюй» не відомо.

Мета цієї статті полягає в дослідженні можливостей НЛС для управління планом реалізації дій АІБС завдяки суттєвому зменшенню розмірності завдань прийняття рішень при застосуванні підходу «розділяй і володарюй» і демонстрації можливості такої моделі управління в підтримці автономності АІБС.

**Задача управління АІБС.** Нехай місія АІБС (наприклад колісного робота) полягає в безперервному переміщенні вантажу з позиції *A* на позицію *B* (рис. 1). План реалізації місії поданий як послідовність станів системи «Оточення-АІБС», які АІБС завдяки своїм діям (актуаторам) має послідовно проходити. Для прикладу план реалізації місії можна подати у вигляді замкнутої послідовності станів «Завантажена АІБС на

позиції В», «Переміщення АІБС на позицію 4», «Переміщення АІБС на позицію А», «Розвантажена АІБС на позиції А», «Переміщення АІБС на позицію 3», «Переміщення АІБС на позицію В» і знову на початок послідовності, тобто стан «Завантажена АІБС на позиції В» (рис. 1).

$$\rightarrow B^{Load} \rightarrow 4^{Move} \rightarrow 1^{Move} \rightarrow A^{Move} \rightarrow A^{UnLoad} \rightarrow 3^{Move} \rightarrow 5^{Move} \rightarrow B^{Move} \rightarrow . \quad (1)$$

Окремі етапи плану подані як локальні цілі АІБС. Досягнення кожної локальної цілі у свою чергу

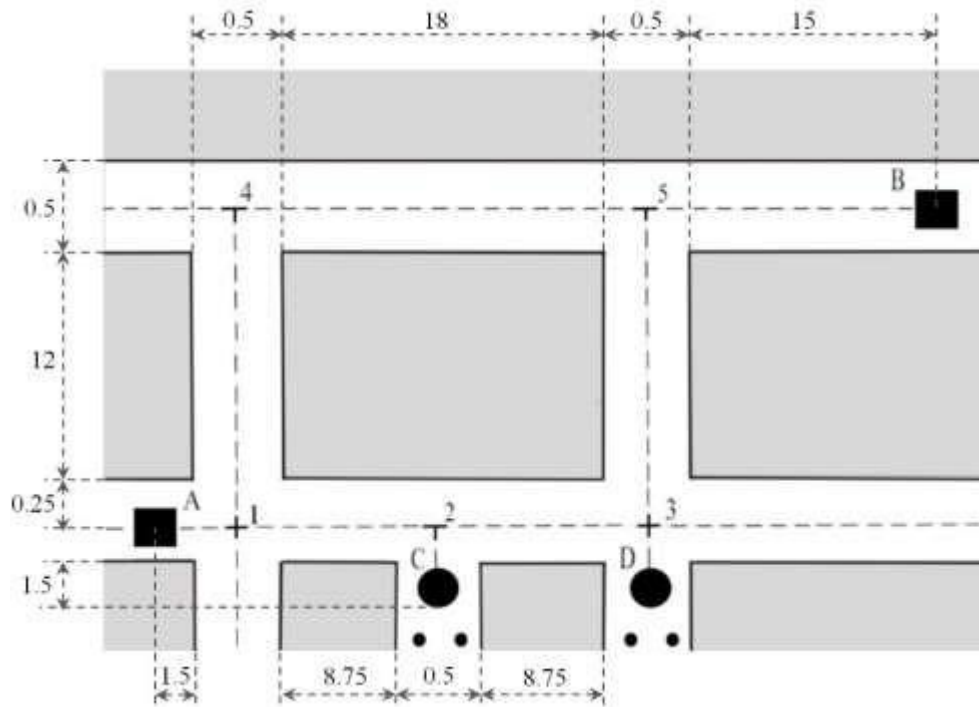


Рис. 1. Модель оточення АІБС

Головна особливість розглянутого в роботі завдання управління – це управління реалізацією плану дій за виразом (1), управління виконанням послідовності дій у певних умовах, що призводять до досягнення цілі. Як згадувалося вище, відомі такі методи управління реалізацією плану дій:

1. Методи програмного управління, використовувані для управління БС перших двох поколінь, – це програмне управління без зворотних зв'язків із ними. До цієї групи методів можна віднести і більшість інтелектуальних алгоритмів управління, розроблених спеціально для реалізації жорсткої послідовності дій у вигляді спеціалізованої програми управління з використанням моделей штучного інтелекту.

2. Методи управління на основі знань (системи, засновані на правилах).

3. Методи і моделі цілеспрямованого управління.

Архітектура пропонованої системи управління являє собою багатопланову структуру. До першого, нижнього, шару належать традиційні

можливо за більш детальним планом дій. Місія реалізується за умов подолання перешкод. Розглядається кілька типів перешкод, наприклад низький заряд акумулятора, що потребує заїзду на станцію заряджання, об'єкт-перешкода на шляху руху АІБС чи руйнування оточення – розмітка на підлозі витерлася або відсутність бічної огорожі. Перешкоди потребують переривання плану реалізації місії, переходу до нового плану усунення перешкоди і продовження реалізації місії.

регулятори, що підтримують задані значення параметрів [17, 21], наприклад такі, як відхилення від лінії при русі робота вздовж розмітки на підлозі та інші. До другого шару належать контролери, що реалізують фрагменти програмного управління окремими послідовностями дій, які не схильні до різного роду збурень, наприклад поворот робота на заданий кут ліворуч чи праворуч, поворот поворотної платформи, завантаження чи розвантаження контейнера, рух вперед до заданого маркера чи відстань до перешкоди. На третьому шарі знаходиться множина локальних НЛС, які містять безпосередньо знання щодо реалізації управління АІБС шляхом активізації певних контролерів першого чи другого рівнів з наданням їм певних значень параметрів. Ці локальні бази знань включають уже невелику кількість традиційних нечітких правил з лінгвістичними змінними, що згруповані окремо для кожного етапу плану й використовуються традиційним механізмом нечіткого виведення. На четвертому шарі знаходиться множина глобальних знань (для кожного плану дій є своя база нечітких правил), які теж обробляються традиційним механізмом нечіткого виведення. І,

нарешті, на п'ятому шарі знаходиться нечітка база знань у вигляді нечітких структурованих правил, що реалізує цілеспрямоване управління АІБС, включаючи перемикання з одного плану дій до іншого залежно від ситуації й повернення до перерваного плану дій, коли збурення усунуто. Відповідно до методу, який реалізує управління, кожний шар отримав свою назву: шар регуляторів, шар програмного управління, шар нечіткого управління етапами плану, шар управління реалізацією плану та шар цілеспрямованого управління. У роботі розглянуто моделі, застосовувані на нижніх чотирьох шарах.

**Контролери шару регуляторів.** До першого, нижнього, шару належать традиційні регулятори, що підтримують задані значення параметрів. Система, що розглядається, включає такі традиційні для класичного управління регулятори: руху робота вздовж розмітки на підлозі, що корегує відхилення робота від лінії розмітки на підлозі (*moveR*) для визначеного параметра похибки управління; руху робота вздовж штучної огорожі на заданій відстані від неї (*moveL*); швидкості руху (*moveV*); позиціонування робота за маркером (*moveM*) (керований параметр - це відстань між заданими точками на зображенні маркера і карті оточення АІБС, що побудована на основі різного типу сенсорів, таких як відео, ультразвукового лідача та інших); зупинки за маркером (*stopM*); зупинки за відстанню (*stopS*); безумовної зупинки (*stop*); повороту на заданий кут (*leftΨ*, *rightΨ*). У табл. 1 наведено приклади застосування ідентифікаторів цих контролерів у командах, що вказані в правилах верхніх шарів, на прикладі оточення АІБС (рис. 1).

T

Таблиця 1

Приклади вказівки на команди контролерів

Шар регулятора	Шар програмного управління. Жорстке програмне управління	Шар програмного управління. Гнучке програмне управління
1	2	3
<i>moveM</i> $M=M^+$	<i>moveM</i>	<i>moveM</i>
<i>moveV</i> $V=12$	$delay\ t_{B-4} = 10.25$	<i>stopS</i> 33.75
<i>leftΨ</i> $\gamma=90^\circ$	<i>move_off_M</i>	<i>leftΨ</i> $\gamma=90^\circ$
<i>moveM</i> $M=M^+$	$delay\ t_{90^\circ} = 0.5\ c$	<i>moveM</i>
<i>rightΨ</i>	<i>leftΨ_off</i>	<i>stopS</i> 12.5
		<i>rightΨ</i> $\gamma=90^\circ$
		<i>moveM</i>

$\gamma=90^\circ$	<i>moveM</i>	<i>stopS 1.5</i>
<i>stopS</i> $S=12.5$	<i>delay t<sub>4→1</sub> = 3.75 c</i>	
	<i>move_off_M</i>	
	<i>rightΨ</i>	
	<i>delay t<sub>90°</sub> = 0.5 c</i>	
	<i>rightΨ_off</i>	
	<i>moveM</i>	
	<i>delay t<sub>1→A</sub> = 0.45 c</i>	
	<i>move_off_M</i>	

**Моделі й методи шару програмного управління.** У методах програмного управління план від вихідної позиції, наприклад з місцезнаходження робота до цільової, поділяється на окремі етапи плану (кадри), послідовність яких є управляючою програмою (УП) АІБС. Контролер програмного управління активізує кадри управляючої програми шляхом активізації вказаної команди, контролює завершення виконання цього етапу (успішне чи аварійне) і приймає рішення про активізацію наступного етапу. В УП, що реалізує жорстке програмне управління, умовою завершення етапу є час (у кадрі УП задається інтервал часу). Далі методи управління демонструються на прикладі АІБС з обмеженим набором команд управління, а саме мобільним роботом з набором команд *вперед, праворуч, ліворуч*. У методі жорсткого програмного управління видача команди викликає початок відповідної дії (руху робота). Ця команда не змінюється, і відповідно реалізація команди триває до тих пір, поки не буде видана наступна команда, що вимикає (деактивізує) попередньо увімкнуту дію. Метод жорсткого програмного управління передбачає, що реалізація команди, наприклад переміщення, здійснюється з постійними характеристиками (швидкість руху) і триває певний час.

Розглянемо на прикладі оточення колісного робота, що рухається маршрутом  $B^{Load} \rightarrow 4^{Move} \rightarrow 1^{Move} \rightarrow A^{Move} \rightarrow A^{Unload}$  (рис. 1) зі швидкістю  $V = 3 \text{ м/с}$ . При точно заданих відстанях між ключовими точками маршруту розраховується потрібний час для досягнення цих точок, наприклад  $S_{B \rightarrow 4} = 33.75 \text{ м}$ ,  $t_{B \rightarrow 4} = 10.25 \text{ с}$ . Це значення вказується в команді затримки, що впливає з команди *moveM*. У табл. 1 у стовпці 2 (жорстке програмне управління) наведено УП, що реалізує фрагмент плану за виразом (1). З прикладу видно, що до складу команд методу жорсткого програмного управління обов'язково входить команда затримки (*delay*) з параметром часу. Контролер, що інтерпретує УП, при обробці цієї

команди затримує на  $t$  одиниць часу початок виконання наступної команди. Інтерпретація УП є жорсткою послідовністю виконання команд:  $i$ -та за порядком команда в УП не може почати виконуватися, доки не буде завершено виконання  $i-1$ -ї команди.

Метод жорсткого програмного управління вимогливий до попереднього впорядкування середовища: обов'язкові вимоги щодо жорсткого дотримання розрахованої швидкості переміщення й миттєві режими розгону/гальмування робота. Ці вимоги для колісних роботів практично ніколи неможливо виконати. Навіть при точних розрахунках часу для точно вимірених відстаней і заздалегідь встановлених у реальному світі робот дещо відхиляється від розрахованого часу, зокрема через часові відхилення на розгін і гальмування. Ці дрібні відхилення накопичуються, що врешті-решт призводить до аварії. Це є головним обмеженням застосування методу жорсткого програмного управління в АІБС, де необхідно підтримувати автономність в умовах різноманітних збурень.

У методі програмного управління зі зворотними зв'язками (гнучке програмне управління) для ідентифікації подій, наприклад виходу робота на певні позиції, використовуються дані від датчиків, а не інтервали часу. У табл. 1 у третьому стовпці наведено УП, у якій у командах використовуються дані від двох датчиків. Реалізацію команди *moveM* в УП підтримує контролер управління рухом вздовж розмітки на підлозі, що використовує дані від датчиків відображення. Умова вимикання команди переміщення під управлінням контролера задається конкретним значенням пройдені відстані, наприклад  $S_{B \rightarrow 4} = 33.75$  у команді *stopS 33.75* (табл. 1). Контролер програмного управління звертається до контролера першого шару *stopS*, який, отримуючи в реальному часі дані від датчика одометра, розраховує поточну відстань і видає сигнал вимкнути контролер

руху  $moveM$ , коли значення відстані дорівнює зазначеному чи більше нього.

Методи гнучкого програмного управління мають переваги порівняно з методами жорсткого програмного управління. По-перше, завдяки використанню даних від датчиків розширюються можливості подолання перешкод, оскільки етапи плану завершуються на підставі фактичних даних про стан оточення, а не на очікуваних попередньо розрахованих даних про час виконання команди. По-друге, на підставі методу програмного управління зі зворотними зв'язками створюються різні варіанти управління реалізацією планів, наприклад ситуаційне управління, де є можливість задавати і контролювати будь-якої складності ситуацію завершення виконання етапу. Крім того, в УП можуть бути етапи з різними контролерами управління, тобто за етапом жорсткого програмного управління може бути етап, що реалізує гнучке програмне управління, коли умовою завершення етапу є пройдена відстань, відстань до перешкоди чи наявність певного маркера, що ідентифікується камерою зору. У роботі розглянуто ще приклад використання матриці датчиків відображення, що дає змогу розпізнавати маркери на підлозі. Це контролер  $moveR$ , який для ідентифікації маркерів на підлозі має такі еталони:  $M^-$  – маркер звичайної розмітки,  $M^+$  – маркер перехрестя,  $M^A$  – маркери позицій,  $M^0$  – відсутність будь-якого маркера.

Незважаючи на перераховані переваги, методи гнучкого програмного управління, у тому числі ситуаційного, мають недоліки, що обмежують їхні можливості підтримки автономності АІБС при вирішенні завдань, що розглядаються у статті, а саме збурення спричиняють ситуації (стан навколишнього середовища), коли реалізація дії відповідно до етапу унеможливується. Дія є, а очікуваного результату немає. Наприклад, для досягнення мети потрібно, щоб АІБС перемістилася з позиції, де вона знаходиться, до позиції 5. У кадрі УП задана мета як умова завершення дії, а не вказані умови, потрібні, щоб активізація команди призвела до успішної реалізації переміщення. Тому успішна реалізація УП гнучкого й ситуаційного програмного управління залежить від упорядкування середовища, як і раніше для методу жорсткого програмного управління, тобто під конкретне упорядковане середовище потрібно створювати спеціальну УП. Порушення будь-якого впорядкування такого середовища призводить до неможливості закінчення виконання УП. Це суперечить принципам автономності й є обмеженнями для використання в «чистому» вигляді всіх розглянутих вище методів програмного управління в АІБС.

**Шар нечіткого управління окремими етапами плану. Методи управління на основі систем, що ґрунтуються на правилах.**

У робототехніці, інтернеті речей і розумних машинах для прийняття управляючих рішень у

реальному часі на основі різноманітних даних, у тому числі і від датчиків, використовують такі моделі й методи штучного інтелекту, засновані на правилах [25, 26]:

- 1) системи, засновані на правилах з символічним поданням знань і символічним виведенням (продукційні моделі);
- 2) системи, засновані на правилах з символічним поданням знань та імовірнісним виведенням (бассові моделі);
- 3) системи, засновані на правилах з символічним поданням знань і виведенням на основі фактора впевненості;
- 4) системи, засновані на правилах з лінгвістичними змінними подання знань і нечітким виведенням.

Усі чотири перелічені вище системи, засновані на правилах, задовольняють вимоги щодо формування управляючого рішення з урахуванням певних умов, заданих у правилах.

ЯКЩО умова ТОДІ дія ( $p$ ). (2)

Якщо стан системи «Оточення-АІБС» співпадає з умовою якогось правила, то реалізується дія, вказана в правилі. При обговоренні питання щодо можливості застосування тієї чи іншої моделі для управління в АІБС треба брати до уваги тип системи «Оточення-АІБС», оскільки механізми виведення цих моделей мають особливості. Так, перший тип є класичною системою з продукційними правилами і припускає замкнутість, повноту знань і відсутність будь-якої невизначеності. Тому ці моделі заздалегідь не розглядаються як ті, що можуть бути застосовані для забезпечення автономності АІБС. Дві наступні моделі – імовірнісний і виведення на основі фактора впевненості – ураховують неповноту знань, пов'язану з причинно-наслідковими зв'язками, і рішення формується тільки в умовах такої невизначеності. Однак їм притаманні два недоліки порівняно з нечіткими моделями. По-перше, вони не враховують нечіткість локалізації самих об'єктів і явищ, між якими існують вказані вище причинно-наслідкові зв'язки. У той же час НЛС ураховують обидва типи невизначеностей. Експертні оцінки у вигляді функцій належностей відображують нечіткість визначення умови та дії, а вага  $p$  правила (2) ураховує неповноту знань про причинно-наслідкові зв'язки між умовою та дією. Друга перевага НЛС – вони обробляють усі правила нечіткої бази знань паралельно й за один крок нечіткого виведення отримують рішення. У той же час імовірнісні та моделі на основі фактора впевненості потребують багатокрокового послідовного виведення проміжних фактів, щоб отримати рішення. Для систем реального часу це є суттєвим недоліком. Отже, НЛС повною мірою враховують різні причини невизначеності та є такими, що здатні в реальному часі виконувати нечітке логічне виведення з урахуванням динаміки змін вхідних даних.

Як було зазначено раніше, у «чистому» вигляді нечіткі системи не можуть бути застосовані в додатках, до яких належить АІБС. Вказані проблеми можуть бути подоланими завдяки особливостям процесу управління реалізацією плану в АІБС. Перша особливість полягає в тому, що не всі правила чи групи правил одночасно беруть участь у визначенні управління, а тільки ті, які пов'язані з реалізацією актуального етапу плану. Отже, проблему великої розмірності задачі прийняття рішень в АІБС можна подолати шляхом «розділяй» на окремі незалежні завдання управління окремими етапами плану і «володарюй» шляхом застосування глобальних знань. Для цього база знань структурується. Множина правил розбита на окремі локальні НЛС відповідно до етапів плану і шар нечіткого управління етапами плану містить множину цих НЛС. З кожним етапом плану може бути пов'язано кілька локальних НЛС, які відповідають за управління реалізацію плану при різних збуреннях. Ці локальні НЛС є незалежними одна від одної. Обробка правил з локальних НЛС потребує модифікації механізму нечіткого виведення, а саме на кожен момент часу механізм має «знати», чи є актуальною НЛС, яку він обробляє. Друга особливість пов'язана з тим, що реалізація дії є процесом, що триває певний час, поки не буде досягнуто локальної мети, а дія «запускається» активізованим правилом, коли виникає певна подія. У всіх інших випадках активізація цього правила неприпустима. Це ще зменшує кількість правил, які одночасно формують управління в певній ситуації, що поліпшує налаштування бази знань при її створенні. А для врахування цієї особливості при обробці правил потрібно, щоб була можливість тимчасово «приховувати» певні правила НЛС, а механізм мав можливість їх «бачити» тільки тоді, коли трапляються певні події, вказані в правилі. Третя особливість, яка допомагає подолати вказані проблеми, – це можливість відслідковувати контекст у процесі реалізації плану. Якщо ввести контекстні факти і для їхньої підтримки застосувати контекстну пам'ять, факти з якої є вхідними чи вихідними змінними локальних НЛС, то це суттєво скорочує кількість входів і виходів системи та захищає від використання при збуреннях помилкових вхідних даних НЛС порівняно з традиційним підходом, коли застосовуються входи з часовими затримками.

Усі три згадані особливості враховуються в моделі з правилами продукцій. Однак, якщо побудувати нечітку систему на концепції продукційних систем, у цьому випадку будуть втрачені переваги нечіткого логічного виведення традиційних систем, заснованих на лінгвістичних змінних. Тому в роботі розглядається варіант, коли нечітка система на базі лінгвістичних змінних модифікується так, щоб вона підтримувала функції згаданих продукційних систем і зберегла механізм нечіткого виведення на правилах з лінгвістичними змінними.

Структура складається з таких компонент: системи сприйняття (СС), яка містить факти, що описують стан «Оточення-АІБС» на підставі даних від сенсорів, контекстної пам'яті (КП), яка містить факти, що характеризують стан виконання плану і локальних НЛС, частина яких належить до шару нечіткого управління окремими етапами плану, а інша частина до шару управління реалізацією плану. Кожна з НЛС зберігає модель традиційної НЛС: входами й виходами системи є чисельні змінні, на універсумі яких побудовані ЛЗ, які так само входять до нечітких правил. Частина цих входів і виходів є чисельними характеристиками фактів з СС, а частина з КП. У нечітких правилах передбачена можливість виділити ЛЗ, що належать КП (наявність зірочки в імені ЛЗ), і лінгвістичні вирази, що описують події. Лінгвістичні вирази в правилах НЛС мають традиційну форму «Ім'я ЛЗ є терм ЛЗ», тільки як Ім'я ЛЗ застосовуються нечіткі характеристики стану фактів. Факт може перебувати у збудженому, загальмованому чи невизначеному стані. Чисельною оцінкою стану факту є нечіткий фактор впевненості, введений у роботу [25] як нечітке LR число  $X$  з гаусовою L-R функцією належностей

$$X : \{x \mid m_X(x), \forall x \in [-q, +q], q \geq +1\}$$

$$m_X^L(x) = \exp(-(x - \alpha)^2 / 2 \cdot (v_L \cdot t_L)^2), \forall x \in [-1, \alpha]$$

$$m_X^R(x) = \exp(-(x - \alpha)^2 / 2 \cdot (v_R \cdot t_R)^2), \forall x \in (\alpha, +1]$$

з трьома параметрами:  $(-1.0 \leq \alpha \leq +1.0)$  – впевненість;  $t_L$  – інтервал часу з моменту отримання даних;  $t_R$  – інтервал часу з моменту зміни даних. Передбачувана впевненість (ПВ) є чисельною оцінкою нечіткого фактора впевненості, яка враховує старіння даних, розраховується на підставі виразів (3) і (4):

$$cf = \alpha \cdot k_t,$$

де  $v_L, v_R$  – коефіцієнти швидкості старіння даних;

$$k_t = 1 - \frac{\sum_{\forall x \in [-1, \alpha]} m_X^L(x) + \sum_{\forall x \in (\alpha, +1]} m_X^R(x)}{\text{Card}([-1, +1]) - 1}$$

Старіння даних з часом призводить до того, що впевненість у тому, що факт знаходиться у збудженому  $cf \approx +1$  чи загальмованому  $cf \approx -1$  станах, прагне до нуля, що характеризує невизначеність стану (повна відсутність впевненості), тобто  $cf \approx 0$ . Для випадків, коли інтервали часу невеликі (чи з моменту отримання інформації, чи в спеціальних випадках з моменту змінення даних), впевненість не дуже змінюється порівняно з  $\alpha$ , тобто  $cf \approx \alpha$ .

Нижче наведено приклади правил цього шару, у яких можна побачити всі перелічені вище особливості.

П<sub>1</sub>: **ЯКЩО**  $CF\_I^{Move}$  is high **ТА**  
 $Event(CF\_M^0$  is high) **ТА**  
 $CF\_D^R \& Close$  is high **ТА**  $CF\_P$  is high  
**ТОДІ**  $CF\_MoveL$  is high,  $CF\_MoveM$  is low,  
 $V$  is meddle,

П<sub>2</sub>: **ЯКЩО**  $CF\_I^{Move}$  is high **ТА**  $Event(CF\_M^-$  is high)  
**ТОДІ**  $CF\_MoveM$  is high,  $CF\_MoveL$  is low,  
 $V$  is high,

П<sub>3</sub>: **ЯКЩО**  $CF\_I^{Move}$  is high **ТА**  $Event(CF\_M^+$  is high) **ТА**  $CF\_M^l$  is high  
**ТОДІ**  $CF\_Stop$  is high,  $V$  is zero.

Кожне правило у виразах (6) належить до локальної НЛС, що управляє реалізацією етапу  $I^{Move}$ . В імені ЛЗ  $CF\_I^{Move}$ , а саме частині, що вказує на ідентифікатор етапу  $I^{Move}$ , вказана зірочка, що є ознакою контекстного факту, відповідного сенсорному факту  $I^{Move}$ . Факт активізується при актуалізації відповідного етапу плану правилами верхнього шару. Правило П<sub>1</sub> буде спрацьовувати тільки один раз, коли станеться подія «порушено розмітку на підлозі», вздовж якої рухається робот до позиції  $l$ . На це вказує запис  $Event(CF\_M^0$  is high). Для всіх інших моментів часу це правило приховано від механізму виведення й не обробляється. Далі в правилі перевіряється наявність огорожі за показниками сенсора відстані  $D^R \& Close$  is high і достатнього рівня заряду акумуляторної батареї  $CF\_P$  is high. Коли зазначена ситуація має місце, правило активізує такі дії: по-перше, вимикає контролер управління рухом вздовж розмітки на підлозі  $CF\_MoveM$  is low; по-друге, вмикає контролер управління рухом вздовж огорожі  $CF\_MoveL$  is high; по-третє, перемикає швидкість руху на середню  $V$  is meddle. Це правило демонструє переваги гібридного застосування в полі ТОДІ двох типів нечітких компонент: ЛЗ, визначені на універсумі домену, – це швидкість руху, задана на відповідній шкалі, і факти, задані на універсумі ПВ. Правило П<sub>2</sub>, як і П<sub>1</sub>, буде спрацьовувати тільки один раз, коли станеться подія «з'явилася розмітка на підлозі»  $Event(CF\_M^-$  is high). Це правило повертає управління контролеру руху вздовж розмітки. І правило П<sub>3</sub>, коли робот наїде на маркер перехрестя на підлозі (подія  $Event(CF\_M^+$  is high)) і локалізує маркер позиції  $l$   $CF\_M^l$  is high, зупиняє рух на перехресті для отримання інформації про безпеку перетину перехрестя.

**Шар управління реалізацією плану.**  
 Реалізація плану дій (1) потребує реалізації не будь-якої траєкторії досягнення кінцевої мети, а певної траєкторії, що проходить через задану послідовність станів системи «Оточення-АІБС». Нечіткі логічні системи належать до систем без пам'яті, тому на будь-якому кроці нечіткого виведення «не знають», які стани системи вже були пройдені і тим більше не знають, якого стану потрібно досягти на поточному кроці, щоб досягнути кінцевої мети. Для подолання цієї проблеми множину незалежних одне від одного нечітких правил БЗ структурують шляхом введення контекстної залежності [25]. Контекстна залежність, на відміну від жорсткої програмної послідовності етапів плану, встановлює послідовність локальних цілей, указаних в етапах плану. При цьому зберігається незалежність одне від одного правил. Такий підхід потребує певної структуризації правил.

Розглянемо приклад структуризації нечітких правил для вирішення завдання, що розглядається в статті. Для цього скористуємося методикою [25]. Як вже було зазначено при обговоренні локальних НЛС, правила шару управління реалізацією плану використовують як сенсорні факти з СС, які подають поточну ситуацію, так і контекстні факти з КП. Нехай СС містить множину **PS** фактів, поділ(ебн)у на дві підмножини **PS<sup>plan</sup>** і **PS<sup>sit</sup>**. Перша містить факти, що використовуються для визначення плану, а друга – факти, що описують ситуацію оточення АІБС (7).

$$\mathbf{PS} = \{\mathbf{PS}^{plan} = \{f_i, i=1, 2, \dots, n\} = \{A^{UnLoad}, B^{Load}, I^{Move}, 2^{Move}, 3^{Move}, 4^{Move}, 5^{Move}, A^{Move}, B^{Move}\}, \mathbf{PS}^{sit} = \{g_j, j=1, 2, \dots, m\}\}. \quad (7)$$

Для кожного факту у виразі (7) із **PS<sup>plan</sup>** для відслідковування стадії виконання плану й відображення її в поточний контекст вводиться ще один факт, а саме контекстний факт, який знаходиться в КП. Зазначимо контекстні факти, як і сенсорні факти  $f_i$  у виразі (7), тільки з верхнім індексом зірочка  $f_i$ . Нижче наведено фрагмент КП, що містить множину **CF** відповідних до виразу (7) контекстних фактів.

$$\mathbf{CF} = \{A^{UnLoad}, B^{Load}, I^{Move}, 2^{Move}, 3^{Move}, 4^{Move}, 5^{Move}, A^{Move}, B^{Move}\}.$$

Отже, на довільний момент часу КП є вектор **CF** значень ПВ

$$\mathbf{CF} = (cf(f_i), cf(f_i), i=1, 2, \dots, n, cf(g_j), j=1, 2, \dots, m). \quad (9)$$

Значення ПВ фактів, що належать фрагментам **PS<sup>plan</sup>** і **PS<sup>sit</sup>**, формуються на підставі даних від сенсорів АІБС, а ПВ контекстних фактів, що належать **CF**, змінюється правилами НЛС шару управління реалізацією плану, що відслідковують контекст [27, 28].

Далі наведено приклад правила, що вказує, коли з'являться дані від сенсорів, які підтверджують, що

ціль, наприклад  $A^{UnLoad}$ , досягнуто (завершено виконання цього етапу плану), то змінюється актуальний контекст. Поточна ціль  $*A^{UnLoad}$  деактуалізується (фактор впевненості цього факту змінюється до значення  $CF_{*A^{UnLoad}} = -1.0$ , а наступна за планом (вираз (1)) локальна ціль актуалізується  $CF_{*I^{Move}} = +1.0$ :

**ЯКЩО**  $event(CF_{*A^{UnLoad}})$  is high **ТА**  $CF_{*A^{UnLoad}}$  is high  
**ТОДІ**  $CF_{*A^{UnLoad}}$  is low,  $CF_{*3^{Move}}$  is high. (10)

НЛС цього шару включає для кожного етапу плану правило типу виразу (10). Так, для плану виразу (1) потрібно вісім правил типу виразу (10). Для реальних завдань АІБС плани організовані ієрархічно: етапи плану верхнього рівня ієрархії складаються з підетапів більш детального плану дій. Таких рівнів плану дій може бути більше двох. Наприклад, етап  $3^{Move}$  плану виразу (1) для реалізації потребує більш детального плану, який включає підетапи  $1^{Move} \rightarrow 2^{Move} \rightarrow 3^{Move}$  (рис. 1). Для подання етапу плану, який складається з підетапів, потрібно вказати, що цей етап не є безпосередньо реалізацією дії АІБС, і його контекстний факт не вказує безпосередньо на факт сенсорних даних. Цей факт вказує на множину впорядкованих контекстних фактів. По суті це є узагальненим контекстом контекстних фактів. У виразі (10) такий факт-контекст-контекстів позначений двома зірочками  $**3^{Move}$ . Три правила для кожного підетапу етапу  $3^{Move}$ , що реалізують план виразу (1):

П<sub>1</sub>: **ЯКЩО**  $event(CF_{**3^{Move}})$  is high  
**ТОДІ**  $CF_{*1^{Move}}$  is high,  
П<sub>2</sub>: **ЯКЩО**  $CF_{**3^{Move}}$  is high **ТА**  $CF_{*1^{Move}}$  is high  
**ТА**  $event(CF_{*1^{Move}})$  is high  
**ТОДІ**  $CF_{*1^{Move}}$  is low,  $CF_{*2^{Move}}$  is high,  
П<sub>3</sub>: **ЯКЩО**  $CF_{**3^{Move}}$  is high **ТА**  $CF_{*2^{Move}}$  is high  
**ТА**  $event(CF_{*2^{Move}})$  is high  
**ТОДІ**  $CF_{*2^{Move}}$  is low,  $CF_{*3^{Move}}$  is low,  
 $CF_{*3^{Move}}$  is high. (11)

Правило (10) після активізації актуалізує всі три правила виразів (11). Це забезпечує присутність активного контекстного факту  $**3^{Move}$  у всіх правилах і разом із цим активізує факт  $*1^{Move}$  за допомогою правила П<sub>1</sub>. Актуалізовані правила П<sub>2</sub> і П<sub>3</sub> активізуються, коли з'являється відповідна подія, а саме сенсорні дані активізують відповідні сенсорні факти  $1^{Move}$  і  $2^{Move}$ . Правило П<sub>3</sub> при активізації деактуалізує факт-контекст-контекстів  $CF_{**3^{Move}}$  is low і активізує наступний етап нижнього рівня ієрархії, а саме факт-контекст нижнього рівня ієрархії  $*3^{Move}$ .

З кожним із етапів нижнього рівня плану, а точніше з локальною метою етапу, наприклад  $*1^{Move}$ , пов'язано декілька локальних НЛС, що належать до шару нечіткого управління окремими етапами плану. У цих НЛС наведено знання, які описують безпосередньо умови застосування дій, що ведуть до локальної мети, плани уникнення небезпечних ситуацій чи плани виходу з небажаних ситуацій, які непередбачено з'явилися.

Для проведення комп'ютерних експериментів була створена НЛС із чотирьох шарів, як зазначалося раніше. Перелік ЛЗ наведено в табл. 2. Комп'ютерні експерименти проводилися для трьох типів перешкод: пошкодження розмітки, низький заряд акумуляторної батареї, об'єкт перешкода на шляху робота. Кількість вхідних ЛЗ складає 33, з них 11 (12-22 у табл. 2) - це факти з КП (9) і шість вихідних ЛЗ.

Лінгвістичні змінні Фечіткої логічної системи  
а управління АІБС  
б

Номер з/п	Ім'я ЛЗ/сенс	Універсум	Терм-множина	Функція належностей
1-11	$CF_{fi}$ / факти плану	$CF: [-1, 1]$	<i>low, high</i>	$lz(-0.5, 0.25), ls(-0.25, 0.5)$
12-22	$CF_{*fi}$ / факти-супутники	$CF: [-1, 1]$	<i>low, high</i>	$lz(-0.5, 0.25), ls(-0.25, 0.5)$
23	$CF_{M^+}$ / маркер перехрестя	$CF: [-1, 1]$	<i>low, high</i>	$lz(-0.5, 0.25), ls(-0.25, 0.5)$
24	$CF_{M^C}$ / маркер зарядної позиції	$CF: [-1, 1]$	<i>low, high</i>	$lz(-0.5, 0.25), ls(-0.25, 0.5)$
25	$CF_{M^A}$ / маркер позиції А	$CF: [-1, 1]$	<i>low, high</i>	$lz(-0.5, 0.25), ls(-0.25, 0.5)$
26	$D^L$ / відстань до перешкоди ліворуч	$[0, \infty)$	<i>close, far</i>	$lz(0.3, 1), ls(0.7, 2)$
27	$D^R$ / відстань до перешкоди праворуч	$[0, \infty)$	<i>close, far</i>	$lz(0.3, 1), ls(0.7, 2)$
28	$D^A$ / відстань до перешкоди попереду	$[0, \infty)$	<i>close, far</i>	$lz(0.3, 1), ls(0.7, 2)$
29	$P$ рівень заряду батареї	$[0, 100]$	<i>low, medium, high</i>	$lz(0.3, 1), trap(15, 45, 55, 70), ls(0.7, 2)$
30	$Charge$ / заряджання батареї здійснене	$[0, 100]$	<i>low, high</i>	$lz(50, 75), ls(75, 90)$
31	$Rotate_{Left}$ / поворот ліворуч здійснений	$[-180, 180]$	<i>low, high</i>	$lz(-90, -75), ls(-25, 0)$
32	$Rotate_{Right}$ / поворот праворуч здійснений	$[-180, 180]$	<i>low, high</i>	$lz(60, 75), ls(75, 90)$
33	$Rotate_{Around}$ / поворот назад здійснений	$[-180, 180]$	<i>low, high</i>	$lz(150, 170), ls(170, 180)$

Правила наведені в табл. 3, результати моделювання – табл. 4.

Таблиця 3

№	event	Inputs			Outputs			Move	Charge	Rotate
		$f_i$	$\bar{f}_i$	Marker	Detector	P	$f_o$			
1	$Rotate_{left}$							1		Left: -1
2	$Rotate_{right}$							1		Right: -1
3	$Rotate_{around}$							1		Around: -1
4	$B_{load}$		high					$B_{load}: -1$ $5_{Move}: 1$		
5			high	high		high		$5_{Move}: -1$ $4_{Move}: 1$		
6			high	low	$D^+$ : far	high		$5_{Move}: -1$ $4_{Move}: 1$		
7			high	high		medium OR low		$5_{Move}: -1$ $3_{Move}: 1$		Left: 1
8			high	low	$D^+$ : far	medium OR low		$5_{Move}: -1$ $4_{Move}: 1$		Left: 1
9			high	high				$4_{Move}: -1$ $1_{Move}: 1$		Left: 1
10			high	low	$D^+$ : far			$4_{Move}: -1$ $1_{Move}: 1$		Left: 1
11		high low	high	high		medium OR high		$1_{Move}: -1$ $A_{Move}: 1$		Right: 1
12		high low	high	low	$D^+$ : far $D^+$ : far	medium OR high		$1_{Move}: -1$ $A_{Move}: 1$		Right: 1
13		high low	high	high		low		$1_{Move}: -1$ $2_{Move}: 1$		Left: 1
14		high low	high	low	$D^+$ : far $D^+$ : far	low		$1_{Move}: -1$ $2_{Move}: 1$		Left: 1
15		high	high	high				$1_{Move}: -1$ $A_{Move}: 1$		
16		high	high	low	$D^+$ : far $D^+$ : far			$1_{Move}: -1$ $A_{Move}: 1$		
17		high low	high	high				$3_{Move}: -1$ $D_{Move}: 1$		
18		high low	high	low	$D^+$ : far $D^+$ : far			$3_{Move}: -1$ $D_{Move}: 1$		
19		high	high	high				$3_{Move}: -1$ $D_{Move}: -1$		Left: 1

Продовження табл. 3

№	event	Inputs				Detector	P	Outputs				Charge	Route
		$f_i$	$\bar{f}_i$	Marker	$\bar{f}_i$			$f_i$	$\bar{f}_i$	Move			
20		$D^{Move}; high$	$\bar{f}_i$	$M^+; low$	$D^R; far$			$3^{Move}; 1$	$3^{Move}; -1$		-1		<i>Left: 1</i>
21				$M^C; high$	$D^L; far$			$D^{Move}; -1$	$2^{Move}; 1$		-1	1	
22	Charge	$D^{Move}; high$				high		$D^{Move}; 1$	$3^{Move}; 1$		-1	-1	<i>Around: -1</i>
23		$3^{Move}; high$	$2^{Move}; high$	$M^+; high$				$2^{Move}; 1$	$2^{Move}; -1$		1		
24		$3^{Move}; high$	$2^{Move}; high$	$M^+; low$	$D^L; far$			$2^{Move}; -1$	$2^{Move}; -1$		1		
25		$1^{Move}; high$	$2^{Move}; high$	$M^+; high$				$1^{Move}; 1$	$2^{Move}; -1$		-1		<i>Right: 1</i>
26		$1^{Move}; high$	$2^{Move}; high$	$M^+; low$	$D^R; far$			$2^{Move}; 1$	$2^{Move}; -1$		-1		<i>Right: 1</i>
27		$C^{Move}; high$	$2^{Move}; high$	$M^+; high$				$2^{Move}; -1$	$2^{Move}; -1$		-1		<i>Left: 1</i>
28		$C^{Move}; high$	$2^{Move}; high$	$M^+; low$	$D^L; far$			$1^{Move}; 1$	$2^{Move}; -1$		-1		<i>Left: 1</i>
29				$M^C; high$				$C^{Move}; 1$	$2^{Move}; -1$		-1	1	
30	Charge	$C^{Move}; high$				high		$A^{Move}; 1$	$2^{Move}; 1$		-1	-1	<i>Around: -1</i>
31				$M^A; high$				$A^{Move}; 1$	$A^{Move}; -1$		-1		
32	$A^{Unload}$		$A^{Unload}; high$					$A^{Unload}; 1$	$A^{Unload}; 1$				
								$A^{Unload}; 1$	$A^{Unload}; -1$				

Таблиця 4

## Результати моделювання

Ітерація	Точка	Тип даних	Дані
1	B	Вхідні дані	[0,0,-1,-1,-1,-1,-1,-1,-1,-1,-1,-1,-1,-1,-1,-1,-1,-1,-1,-1,-1,0.15,0.15,3,60]
		Подія	event( <i>B<sub>Load</sub></i> )
		Вихідні дані	[0,1,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,-1,0,0,0,0,1,0,0,0,0,1,0,0,0,0]
2	5	Вхідні дані	[0,1,-1,-1,-1,-1,-1,-1,-1,-1,-1,-1,-1,-1,-1,-1,-1,-1,-1,-1,-1,3,0.15,3,60]
		Вихідні дані	[0,0,0,0,0,0,1,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0.75,0.25,-1,0,0,0,0,-0.5,0,0,75,0,0]
3	5	Вхідні дані	[0,1,-1,-1,-1,-1,1,-1,1,-1,-1,-1,-1,-1,-1,-1,-1,-1,-1,-1,-1,3,3,3,60]
		Подія	event( <i>Rotate<sub>Left</sub></i> )
		Вихідні дані	[0,1,0,-1,0,0]
4	3	Вхідні дані	[0,1,-1,-1,-1,-1,1,-1,1,-1,-1,-1,-1,-1,-1,-1,-1,-1,-1,-1,-1,3,3,3,60]
		Вихідні дані	[0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,-1,0,0,0,0,0,1,1,0,0,0,0]
5	D	Вхідні дані	[0,1,-1,-1,-1,-1,1,-1,1,-1,-1,-1,-1,-1,-1,-1,-1,-1,-1,-1,-1,0.15,0.15,3,60]
		Вихідні дані	[0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,1,0,0,0,0,0,0,0,0,0,-1,-1,1,0,0,0]
6	D	Вхідні дані	[0,1,-1,-1,-1,-1,1,-1,1,-1,1,-1,-1,-1,-1,-1,-1,-1,-1,-1,-1,1,0.15,0.15,3,100]
		Подія	event( <i>Charge</i> )
		Вихідні дані	[0,-1,0,0,1]
7	D	Вхідні дані	[0,1,-1,-1,-1,-1,1,-1,1,-1,1,-1,-1,-1,-1,-1,-1,-1,-1,-1,-1,1,0.15,0.15,3,100]
		Подія	event( <i>Rotate<sub>Around</sub></i> )
		Вихідні дані	[0,-1]
8	3	Вхідні дані	[0,1,-1,-1,-1,-1,1,-1,1,-1,1,-1,-1,-1,-1,-1,-1,-1,-1,-1,-1,3,3,3,100]
		Вихідні дані	[0,0,0,0,1,0,0,0,0,0,-1,0,0,0,1,-1,0,0,0,0,0,0,-1,0,1,0,0]
9	3	Вхідні дані	[0,1,-1,-1,1,-1,1,-1,1,-1,-1,1,-1,-1,-1,-1,-1,-1,-1,-1,-1,3,3,3,100]
		Подія	event( <i>Rotate<sub>Left</sub></i> )
		Вихідні дані	[0,0]

10	2	Вхідні дані	[0,1,-1,-1,1,-1,1,-1,1,-1,1,-1,1,-1,1,-1,1,-1,1,-1,1,-1,3,0.15,3,100]
		Вихідні дані	[0,0,0,1,0,0,0,0,0,0,0,0,1,-1,0,0,0,0,0,0,1,0,0,0,0]
11	1	Вхідні дані	[0,1,-1,1,1,-1,1,-1,1,-1,1,1,-1,1,-1,1,-1,1,-1,1,-1,1,3,3,100]
		Вихідні дані	[0,0,1,0,0,0,0,0,0,0,0,0,-1,0,0,0,0,1,0,0,0,1,0,0,0,0]
12	A	Вхідні дані	[0,1,1,1,1,-1,1,-1,1,-1,1,-1,1,-1,1,-1,1,-1,1,-1,1,-1,1,0.15,0.15,3,100]
		Вихідні дані	[0,0,0,0,0,0,0,1,0,0,0,0,0,0,0,0,0,-1,0,0,0,-1,0,0,0,0]
13	A	Вхідні дані	[0,1,1,1,1,-1,1,1,1,-1,1,1,1,-1,1,-1,1,-1,1,-1,1,-1,1,0.15,0.15,3,100]
		Подія	event( <i>A<sub>Unload</sub></i> )
		Вихідні дані	[1,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,-1,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0]

### Висновки.

Підхід «розділай і володарюй» до проєктування системи управління реалізацією плану дій АІБС в умовах невизначеності здатний подолати проблеми, що стоять на шляху застосування традиційних НІС. Показано, що багатопарова організація структури системи управління, яка містить традиційні регулятори

зі зворотними зв'язками на першому шарі, фрагменти управляючих програм методу програмного управління на другому шарі і розподілену нечітку систему на третьому і четвертому шарах, відкриває можливості підтримувати автономність управління в межах спроможності апаратного забезпечення АІБС. Модифікація традиційного механізму логічного виведення в НІС, по-перше, шляхом введення контекстної пам'яті, що містить контекстні факти, по-друге, подання стану фактів, як і значень вхідних змінних НІС у вигляді нечітких факторів впевненості, дає змогу застосувати НІС для управління АІБС та використовувати всі переваги нечіткого управління щодо обробки невизначеності. Проєктування традиційним методом НІС для наведеного в статті прикладу щодо управління планом реалізації автономного вантажного робота в умовах трьох типів збурень, що характеризується більш ніж 35 вхідними чисельними змінними від датчиків, є невіршеним завданням. У той же час, як показали комп'ютерні експерименти, це завдання стає вирішуваним при застосуванні запропонованого підходу з модернізованим механізмом нечіткого логічного виведення.

Надалі планується розроблення прототипу системи, що має багатопарову структуру на базі мікроконтролерів із набором сенсорів.

### Список використаних джерел

- Joseph L., Mondal A. K. (eds). Autonomous Driving and Advanced Driver-Assistance Systems (ADAS). Applications, Development, Legal Issues, and Testing, 1st edn. CRC Press, Boca Raton, 2021. URL: <https://doi.org/10.1201/9781003048381>.
- Lockheed M. The Future of Autonomy. Isn't Human-Less. It's Human More, 2022. Accessed 25 Sept 2022. URL: <https://www.lockheedmartin.com/en-us/capabilities/autonomous-unmanned-systems.html>.
- The Future of Autonomy. Isn't Human-Less. It's Human More. Lockheed Martin, 2022. Accessed: August 25, 2022. URL: <https://www.lockheedmartin.com/en-us/capabilities/autonomous-unmanned-systems.html>.
- Chen H. et al. From Automation System to Autonomous System: An Architecture Perspective. J. of Marine Sci. and Eng. 9(6), 2021. URL: <https://doi.org/10.3390/jmse9060645>.
- Rail Technical Strategy Capability Delivery Plan, 2017. URL: <https://www.rssb.co.uk/rts/Documents/2017-01-27-rail-technical-strategy-capability-delivery-plan-brochure.pdf>.
- Zhang T. et al. Current trends in the development of intelligent unmanned autonomous systems. Frontiers Inf. Technol. Electron. Eng. Vol. 18, Feb. 2017. P. 68–85. doi: 10.1631/FITEE.1601650.
- Reis J., Cohen Y., Melao N., Costa J. and Jorge D. High-Tech Defense Industries: Developing Autonomous Intelligent Systems. Appl. Sci. Vol. 11, 4920, 2021. doi: 10.3390/app11114920.
- Chen J., Sun J., Wang G. From Unmanned Systems to Autonomous Intelligent Systems.

- Engineering 12: 2022. P. 16-19. URL: <https://doi.org/10.1016/j.eng.2021.10.007>.
9. Czerwinski M., Hernandez J., Mcduff D. Building an AI that feels. Appl. Sci. Vol.11, 4920, Apr. 2021. doi: 10.3390/app11114920.
  10. Kargin A., Petrenko T. Feeling Artificial Intelligence for AI-Enabled Autonomous Systems. Conference Proceedings of 2022 IEEE Global Conference on Artificial Intelligence and Internet of Things (GCAIoT) Alamein New City, Egypt. 18-21 December 2022. P. 88-93.
  11. Huang M., Rust R. Artificial Intelligence in Service. J. of Service Res. 21(2), 2018. P. 155-172. URL: <https://doi.org/10.1177/1094670517752459>.
  12. Bachute M. R. and Subheddar J. M. Autonomous Driving Architectures: Insights of Machine Learning and Deep Learning Algorithms. Mach. Learn. with Appl. Vol. 6, Sep. 2021. doi: 10.1016/j.mlwa.2021.100164.
  13. Winfield A. et al. IEEE P7001: A Proposed Standard on Transparency. Front. Robot. AI. Vol. 8, Jul. 2021. doi: 10.3389/frobt.2021.665729.
  14. Huang H. The Autonomy Levels for Unmanned Systems (ALFUS) Framework: Interim Results, Proceedings of the Performance Metrics for Intelligent Systems (PerMIS). Workshop 2006, Gaithersburg, MD, Accessed: January 29, 2023. URL: [https://tsapps.nist.gov/publication/get\\_pdf.cfm?pub\\_id=823586](https://tsapps.nist.gov/publication/get_pdf.cfm?pub_id=823586).
  15. Kargin A., Petrenko T. Knowledge Distillation for Autonomous Intelligent Unmanned System. In: Witold Pedrycz, Shyi-Ming Chen. Advancements in Knowledge Distillation: Towards New Horizons of Intelligent Systems. Studies in Computational Intelligence. Vol. 1100. Springer International Publishing, 2023. P. 193-231.
  16. Каргін А. О., Жуков С. В., Сергеев Д. А., Сілін Є. Л. Модель базового рівня штучного оточення автономних інтелектуальних безлюдних систем на прикладі мобільного роботу що обслуговує. *Системи управління, навігації та зв'язку*. 2023. Вип. 2(72). С. 107-113.
  17. Michels K., Klawonn F., Kruse R., Nürnberger A. Fundamentals of Control Theory. In: Fuzzy Control. Studies in Fuzziness and Soft Computing. Vol. 200. Springer, Heidelberg, 2006. P. 57-234. URL: [https://doi.org/10.1007/3-540-31766-x\\_2](https://doi.org/10.1007/3-540-31766-x_2).
  18. Garcia G., Luengo J., Herrera F. Data preprocessing in data mining. Intelligent Systems Reference Library. Springer Cham, 2015. URL: <https://doi.org/10.1007/978-3-319-10247-4>.
  19. Klein L. A. Sensor and data fusion: A tool for information assessment and decision making, 2nd ed. Bellingham, Washington, USA: SPIE Press, 2012.
  20. West P. et al. Symbolic Knowledge Distillation: from General Language Models to Commonsense Models. 2022. URL: <https://doi.org/10.48550/arXiv.2110.07178>.
  21. Каргін А. А. Введение в интеллектуальные машины. Кн. 1. Интеллектуальные регуляторы. Донецк: Норд-Пресс, ДонНУ, 2010. 526 с.
  22. How To Choose a Rules Engine, Waylay Whitepaper, Accessed: Mar. 15, 2019. URL: [https://static.waylay.io/white-papers/010\\_How-to-Choose-a-Rules-Engine.pdf?\\_s=7t06pcdhyc3621dgs39l](https://static.waylay.io/white-papers/010_How-to-Choose-a-Rules-Engine.pdf?_s=7t06pcdhyc3621dgs39l).
  23. Piegat A. Fuzzy modelling and control. Heidelberg: Physica-Verlag Heidelberg New York, 2001.
  24. Jackson P. Introduction to Expert Systems, 3rd edn. Addison-Wesley, Boston, 1998.
  25. Kargin A., Petrenko T. Spatio-Temporal Data Interpretation Based on Perceptual Model. In: Mashtalir V, Ruban I, Levashenko V (eds) Advances in Spatio-Temporal Segmentation of Visual Data. Studies in Computational Intelligence. Vol. 876. Springer, Cham. 2020. P. 101-159. URL: <https://doi.org/10.1007/978-3-030-35480-0>.
  26. Negnevitsky M. Artificial Intelligence: A Guide to Intelligent Systems. 2nd ed. Addison-Wesley, 2005. 415 p.
  27. Kargin A., Petrenko T. Method of Using Data from Intelligent Machine Short-Term Memory in Fuzzy Logic System. 2021 IEEE 7th World Forum on Internet of Things (WF-IoT). 2021. P. 842-847. URL: <https://doi.org/10.1109/wf-iot51360.2021.9594918>.
  28. Каргін А. А., Іванюк О. І. Модель ситуаційного планування й керування переміщеннями автономного роботу. *Сучасні інформаційні системи*. 2020. Т. 4, № 3. С. 41-51. doi: 10.20998/2522-9052.2020.3.05. URL: <http://ais.khpi.edu.ua/article/view/2522-9052.2020.3.05>.

**Anatolii Kargin, Tetyana Petrenko, Dmytro Hiiivskiy. Autonomous intelligent unmanned systems: control methods and models satisfying the criterion of autonomy.**

When creating new generations of unmanned systems (US), the main attention is paid to the problem of increasing their level of autonomy. The use of artificial intelligence (AI) for control tasks of US in a disordered environment is one of the ways to increase their level of autonomy. Today, the creation of the third generation of feeling AI is relevant to take into account the specifics of control tasks in autonomous intelligent US (AIUS). Control in AIUS is a process of supporting the implementation of the action plan in real time, at each stage of the plan, a decision is made taking into

account the current state of the plan's implementation, the current situation and the ability to implement the remaining part of the action plan to achieve the goal. The article examines programming control methods and knowledge-based control methods in the form of rules. The structure of a multi-layer distributed fuzzy logic system (FLS) is given, which includes a set of independent local FLSs with traditional linguistic variables (LVs) and facts from context memory. A modified fuzzy inference mechanism was considered, which, thanks to the introduction of a fuzzy certainty factor, was able to uniformly process both LV and facts. An example of the use of FLS in AIUS and the results of computer experiments with a wheeled robot are given.

**Keywords.** feeling artificial intelligence, autonomous intelligent unmanned system, fuzzy logic system, action plan management.

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

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

**Гієвський Дмитро Олегович**, аспірант кафедри інформаційних технологій, Український державний університет залізничного транспорту, Харків, Україна. E-mail: [gievskiy@kart.edu.ua](mailto:gievskiy@kart.edu.ua), ORCID ID <https://orcid.org/0009-0006-0151-2317>.

**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](mailto:kargin@kart.edu.ua), ORCID ID <http://orcid.org/0000-0003-2885-9071>.

**Tetyana Petrenko**, Ph.D., Associate Professor, department of information technology, Ukrainian State University of Railway Transport, Kharkiv, Ukraine. E-mail: [petrenko\\_tg@kart.edu.ua](mailto:petrenko_tg@kart.edu.ua), ORCID ID <http://orcid.org/0000-0001-6305-7918>.

**Dmytro Hievskiy**, PhD student, department of information technology, Ukrainian State University of Railway Transport, Kharkiv, Ukraine. E-mail: [gievskiy@kart.edu.ua](mailto:gievskiy@kart.edu.ua), ORCID ID <https://orcid.org/0009-0006-0151-2317>.

ПАНЧЕНКО С. В.д.т.н., професор, (ректор Українського державного університету залізничного транспорту)

БУНЧУКОВ О. А, (департамент автоматики та телекомунікацій Укрзалізниці)

СОТНИК В. О., к.т.н., доцент, кафедра АТ, (Український державний університет залізничного транспорту).

## Аналіз проєктних рішень мікропроцесорної системи рейкових кіл

*Використання мікропроцесорних систем у пристроях залізничної автоматики має ряд особливостей. Перш за все це необхідність забезпечення перевізного процесу. На сьогодні на залізничних магістралях іде масове впровадження цілого ряду мікропроцесорних систем і пристроїв для керування рухом поїздів. Однією з них є мікропроцесорна система рейкових кіл. Її функціонування на різних рівнях ієрархічної побудови та відповідність вимогам нормативних документів з проєктування, забезпечення безпеки руху розглянуто в цій статті. Також проведено аналіз наявних проєктних рішень, реалізованих у мікропроцесорній системі рейкових кіл.*

**Ключові слова:** мікропроцесорна система рейкових кіл (МРК), системи залізничної автоматики та телемеханіки, функціональна безпечність, автоматизоване робоче місце, технічні та програмні засоби мікропроцесорних систем.

**Abstract.** *The use of microprocessor systems in railway automation devices has a number of features. First of all, this is related to the need to ensure the safety of the transportation process. At present, a number of microprocessor systems and devices for controlling the movement of trains are being widely implemented on railway lines. One of them is a microprocessor system of rail circles. Its functioning at different levels of the hierarchical structure and its compliance with the requirements of regulatory documents on design and ensuring traffic safety are discussed in this article. It also analyzes the existing design solutions that were implemented in the microprocessor system of rail circles.*

**Keywords:** *microprocessor system of rail wheels (MRK), systems of railway automation and telemechanics, functional safety, automated workplace, technical and software tools of microprocessor systems.*

### Вступ

Підвищення безпеки та ефективності перевезень є основним пріоритетом у діяльності Департаменту автоматики та телекомунікацій (Департамент ЦШ) АТ «Укрзаліниця». Станції та перегони оснащуються вітчизняними сучасними мікропроцесорними системами залізничної автоматики та телекомунікацій (СЗАТ), які забезпечують ряд переваг перед системами попереднього покоління: підвищену функціональність, високу надійність, низьку вартість обслуговування та менший обсяг монтажних робіт [1]. На залізницях України в постійній і дослідній експлуатації знаходяться сотні різних систем і пристроїв залізничної автоматики.

Порядок взаємодії між замовником (АТ «Укрзаліниця») і розробниками та виробниками на всіх стадіях життєвого циклу СЗАТ (від розроблення до виведення з експлуатації) відповідає нормам і рекомендаціям, що діють у залізничній галузі [2]. Взаємодія сприяє забезпеченню високої надійності та безпеки функціонування пристроїв СЗАТ. Працівники Департаменту ЦШ забезпечують розробників нормативними документами, формують технічні вимоги (ТВ) на нові системи та пристрої, проводять експертизу документації, беруть участь в експлуатаційних, приймальних і кваліфікаційних випробуваннях. Відповідальним завданням Департаменту ЦШ є оцінювання відповідності нових виробів встановленим вимогам і прийняття рішень щодо введення цих виробів у дослідну експлуатацію.

АТ «Укрзалізниця» орієнтується на системи, які задовольняють ТВ та нормативну базу в залізничній галузі, мають відносно невисоку вартість, і ті, що забезпечують для експлуатаційного персоналу простоту і зручність обслуговування з мінімальними витратами.

### Мета і завдання дослідження

Метою цієї статті є аналіз відповідності проєктних рішень рекомендаціям і вимогам документів [2-8] і оцінювання споживчих властивостей СЗАТ на прикладі вітчизняних мікропроцесорних тональних рейкових кіл (МРК) нового покоління, що вже експлуатуються на ряді об'єктів АТ «Укрзалізниця». Впровадження мікропроцесорної системи рейкових кіл (МРК) спрямоване на вирішення завдань удосконалення апаратури та розширення функціональних можливостей систем автоблокування та електричної централізації стрілок і сигналів.

### Загальні відомості про МРК

Призначення МРК – контроль зайнятості/вільності ділянок колії на станціях і перегонах, контроль цілісності рейкових ліній, передавання кодових сигналів автоматичної локомотивної сигналізації (типу АЛСН) з колійних пристроїв на локомотив. Як колійні датчики використовуються тональні рейкові кола (ТРК). Структура МРК ієрархічна і складається з таких рівнів (рис. 1): верхній – людино-машинний і зв'язок із зовнішніми системами. Забезпечує надання оператору інформації про стан ділянок колій і можливість налаштування параметрів МРК, забезпечує зв'язок із зовнішніми системами; середній – логічний рівень контролю та управління. Реалізує алгоритми визначення вільності/зайнятості ділянок колії, алгоритми управління кодуванням АЛСН, алгоритми контролю параметрів рейкових кіл (контроль відповідності рівнів струмів і напруг заданим налаштуванням); нижній – об'єктовий. Забезпечує

ув'язку з елементами колійного обладнання рейкових кіл (трансформаторами, рейковими лініями).

На верхньому рівні виконуються такі функції:

- приймання від середнього рівня інформації про стан рейкових кіл;
- формування і подання експлуатаційному персоналу інформації про події і тривоги, які виникають;
- протоколювання дій оператора;
- передавання на середній рівень повідомлень з командами управління кодуванням рейкових кіл;
- передавання інформації на автоматизоване робоче місце електромеханіка (АРМ ШН) про стан технічних і програмних засобів МРК, виникнення порушень та аварійних ситуацій у їхній роботі;
- архівування всієї інформації про стан технічних і програмних засобів МРК, а також дії оператора;
- оперативна зміна параметрів конфігурації для рейкових кіл з переданням параметрів на середній рівень;
- обмін інформацією з зовнішніми системами через шлюз.

На середньому рівні виконуються такі функції:

- приймання повідомлень від модулів рейкових кіл, їхня обробка за принципом 2oo3d (мажорювання з діагностуванням у триканальній резервованій структурі);
- визначення стану колійного обладнання рейкових кіл з переданням на верхній рівень і зовнішні системи;
- приймання від верхнього рівня та обробка за принципом 2oo3d команд управління кодуванням;
- формування повідомлень із командами управління в об'єктовий рівень;
- самодіагностування технічних і програмних засобів;
- реконфігурування (2oo3d → 2oo2d) при відмові одного з каналів;
- перехід у захисний стан при відмові двох із трьох каналів;
- зміна параметрів рейкових кіл, що надходять із верхнього рівня.

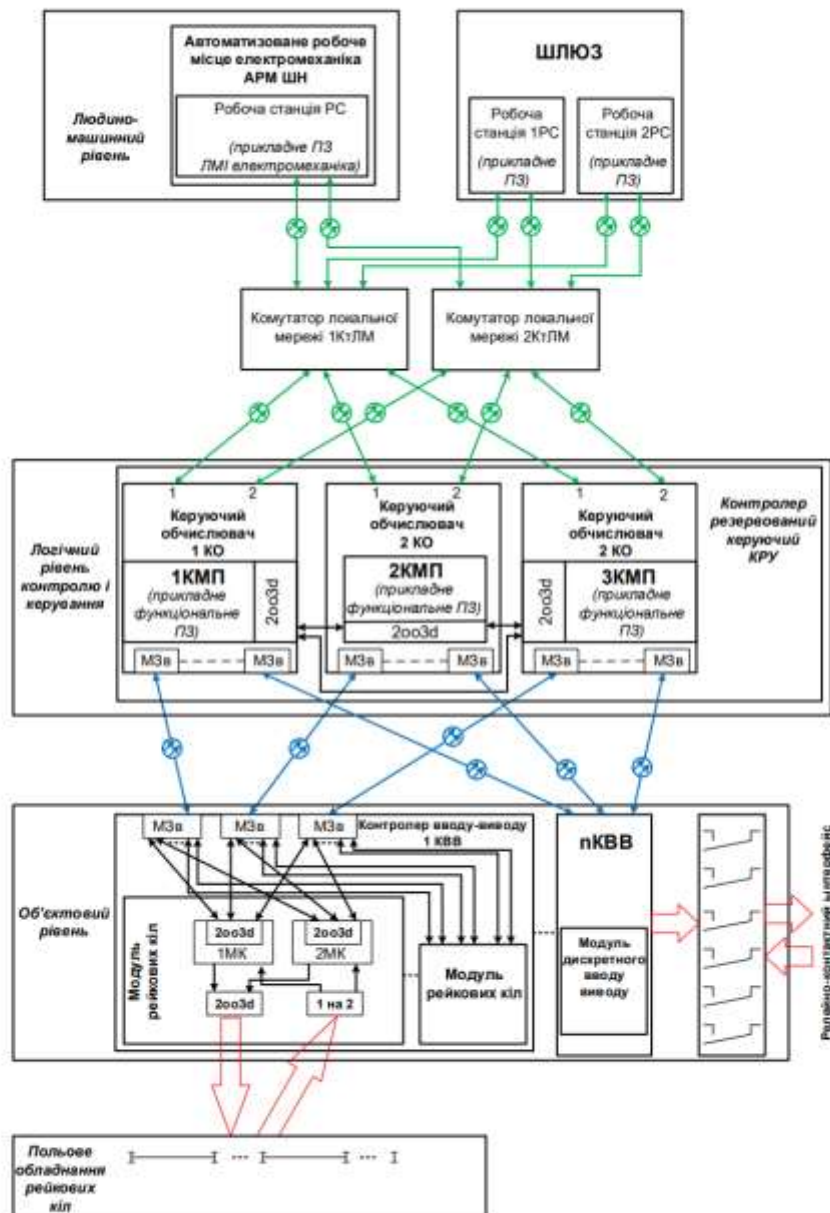


Рисунок 1 – Структура МРК

На нижньому рівні виконуються такі функції:

- приймання команд від середнього рівня з подвійним незалежним мажорунням (2\*(2oo3d));
- формування живлення (сигналів тональної частоти) рейкових кіл, вимірювання рівнів струмів і напруг;
- формування кодів АЛСН за командами від середнього рівня;
- діагностування та передавання інформації про стан обладнання рейкових кіл на середній рівень;
- захист від зовнішніх електромагнітних впливів (викликаних атмосферними явищами, тяговими струмами частотою 50 Гц та ін.);
- самодіагностування технічних і програмних засобів, перехід у захисний стан при виявленні відмов у роботі.

### Аналіз проєктних рішень, реалізованих у МРК

При розробленні та впровадженні нових пристроїв СЗАТ або модернізації наявних необхідно виконувати вимоги ТВ, ТЗ і документів [2-8], основними з яких є уніфікація технічних засобів і комплексний характер СЗАТ; скорочення польового обладнання на перегонах; широке застосування засобів діагностики та самотестування; відповідність четвертому рівню функційної безпеки (SIL4). *Уніфікація.* Застосування уніфікованих технічних рішень і засобів зменшує витрати на експлуатацію СЗАТ і до того ж скорочує термін виходу на ринок нового виробу, зменшує собівартість розроблення та виготовлення і відповідно ринкову вартість. Верхній рівень МРК (людино-машинний і зв'язок із зовнішніми системами) реалізований на базі

промислових комп'ютерів, що експлуатуються як АРМ-Ц ДСП, АРМ-Ц ШН СКД, шлюзів тощо на тих самих залізничних станціях у складі мікропроцесорної електричної централізації (МПЦ) і мікропроцесорного автоблокування (МАН), виробником яких є виробник МРК. Середній – логічний рівень контролю та управління – реалізований на базі контролера резервованого керуючого (КРУ) – безпечного центрального процесора з вбудованим базовим програмним забезпеченням (ПЗ) – компонента МПЦ (того самого виробника), оснащеного прикладним ПЗ, що виконує функції середнього рівня МРК. КРУ включає три незалежні керуючі обчислювачі (КО). Кожен КО складається з контролера мікропроцесорного КМп (microprocessor-based controller) і трьох модулів МЗв для зв'язку з нижнім рівнем. КО, резервуючи один одного, обробляють дані за принципом 2oo3d. Кожен із КМп виконує управління формуванням кодів АЛСН і контроль стану рейкових кіл, взаємодіє з модулями рейкових кіл, верхнім рівнем і суміжними КМп. Нижній – об'єктовий – рівень реалізований з урахуванням цифрових модулів ТРК: живлення рейкових кіл (МЖРК), контролю рейкових кіл (МКРК), дискретного введення-виведення, а також контролера введення-виведення (КВВ). КВВ є крейтом зі встановленими модулями, включаючи модулі зв'язку МЗв. МЖРК 6 призначений для формування сигналів ТРК і кодових сигналів АЛСН, контролю зайнятості РК рухомим складом і контролю цілісності РК. МКРК виконує контроль некодованих відгалужень рейкових кіл. МКРК приймає та обробляє сигнали з двома різними несучими частотами з суміжних рейкових ліній, станційних або перегінних з метою визначення їхнього стану: «вільні» або «зайняті». Модулі дискретного введення-виведення вводять 16 або 32 сигнали типу сухий контакт і формують напругу постійного струму на 16 виходах для управління реле, які застосовуються для реалізації релейно-контактного інтерфейсу з системами релейного типу. Конструкція та інтерфейси модулів нижнього рівня МРК ідентичні модулям об'єктового рівня МПЦ та МАН, що дає змогу інтегрувати МРК у ці системи. При цьому функції верхнього та середнього рівнів МРК реалізуються в аналогічних рівнях МПЦ і МАН, які оснащені відповідним програмним забезпеченням, а нижні (об'єктові) рівні доукомплектовані необхідними модулями ТРК. З урахуванням вищенаведеної інформації проєктні рішення щодо конструювання верхнього, середнього та нижнього рівнів МРК є оптимальними та відповідають вимогам уніфікації технічних засобів і комплексному характеру СЗАТ.

*Скорочення польового обладнання.* МРК встановлюється на станціях і постах, містить пристрої нижнього рівня та фільтри. Польові пристрої розміщуються в безпосередній близькості від рейкової лінії в колійних ящиках, містять трансформатори, пристрої захисту від імпульсних перенапруг і струмів асиметрії (розрядники, вирівнювачі тощо), вимикачі та захисні резистори.

Отже, забезпечений мінімум польового обладнання, необхідного для функціонування МРК.

*Застосування засобів діагностики.* У МРК реалізовано безперервне діагностування обладнання рейкових кіл з видаванням інформації на відеомонітори верхнього рівня, діагностування технічних засобів і програмного забезпечення МРК, архівування подій/порушень. На логічному рівні виконується самодіагностування технічних і програмних засобів, передання діагностичної інформації від об'єктового рівня на верхній рівень. У каналах зв'язку виконується самодіагностування та контроль цілісності повідомлень. На об'єктовому рівні виконуються функції діагностики та контролю: діагностування стану обладнання рейкових кіл (виявлення несправностей чи відмов); передання інформації про стан обладнання рейкових кіл до логічного рівня; постійний контроль параметрів вхідних і вихідних сигналів; самодіагностування технічних і програмних засобів. Реалізовані в МРК процедури діагностування та самодіагностування підвищують показники технічного використання та готовності. За рахунок визначення виду і локалізації місця відмови скорочується час на його пошук та усунення. Завдяки прогнозу появи відмов з подальшим попереджувальним ремонтом скорочується інтенсивність відмов і підвищуються характеристики надійності та показники функційної безпечності МРК.

*Відповідність четвертому рівню функційної безпечності.* Цей рівень безпечності передбачає, що будь-яка поодинокі відмова елемента не має призводити до небезпечної відмови системи і має бути виявлена до того, як у системі може виникнути незалежна відмова іншого елемента (принцип «fail-safe», безпечна відмова). Функційну безпечність МРК безпосередньо визначає функціонування програмно-технічних засобів нижнього та середнього рівнів. До основних рішень, що забезпечили необхідні показники функційної безпечності МРК [4-6], належать реалізація модулів ТРК на мікроконтролерах з різною архітектурою та програмним забезпеченням, яке розроблено двома незалежними групами програмістів і виконує однакові функції; три канали (КМп) у КРУ з мажоритарною обробкою інформації між каналами за логікою «2oo3d» та контролем розбіжностей між інформацією в каналах; внутрішнє дублювання модулів ТРК, що мають по два диверсні канали, що працюють за схемою «2oo2d», які незалежно один від одного приймають команди та формують контрольно-діагностичну інформацію в три канали КРУ, обробляють інформацію та формують вихідні сигнали за логікою «2oo2d»; обробка та виконання команд управління від трьох каналів КРУ проводиться у модулях ТРК за мажоритарною логікою «2oo3d»; у разі порушення роботи в одному з каналів КРУ (наявність розбіжності даних з іншими каналами або порушення зв'язку) здійснюється логічне відключення цього каналу, і модуль ТРК продовжує обробку та виконання команд від двох справних каналів за логікою «2oo2d»; інформація, що приймається

кожним із трьох каналів КРУ від двох модулів ТРК, обробляється за логікою «2oo2d» і за результатами обробки приймається рішення про достовірність даних; загальна контрольно-діагностична інформація, яка приймається кожним із трьох каналів КРУ від двох модулів ТРК, обробляється за логікою «1oo2d»; контрольно-діагностична інформація, яка приймається АРМ-Ц ШН від трьох каналів КРУ, обробляється за логікою «2oo3d» і за результатами обробки приймається рішення про достовірність даних; перехід МРК у захисний стан при порушенні в роботі двох каналів КРУ; перехід модуля ТРК у захисний стан при порушенні в роботі КРУ і двох ліній зв'язку між КРУ та модулем ТРК. Розрахункові дані підтвердили відповідність рівня повноти безпеки МРК вимогам стандартів [4-6] (четвертий рівень згідно з ДСТУ 4178, SIL4 згідно з EN 50129).

**Особливості розрахунку основних режимів мікропроцесорних тональних рейкових кіл ТРК-М**

Метою розрахунків роботи ТРК-М є розроблення регулювальних таблиць, які містять допустимі значення параметрів рейкових кіл (РК) і параметрів сигналів АЛС, які мають бути забезпечені в умовах експлуатації.

До цих параметрів слід віднести довжину РК; мінімальний опір ізоляції рейкової лінії  $R_{i \min}$  (Ом км); максимальну напругу на виході генератора  $U_{\text{гmax}}$  (В); максимальну потужність на виході генератора  $S_{\text{г}}$  (ВА); максимальну напругу на вході приймача  $U_{\text{пп}}$  (В). Наведені параметри РК розраховуються для всіх сигнальних частот при різних довжинах кабелю  $L_{\text{к}}$  (М).

До параметрів АЛС належать напруга кодового сигналу  $U_{\text{кт}}$  (В); потужність кодового сигналу  $S_{\text{кт}}$  (ВА) при різних довжинах РК і кабелю з урахуванням дросель-трансформаторів та ізолюючих стиків.

Виконання розрахунків проводиться при найгірших умовах роботи РК: низький опір ізоляції рейкової лінії, застосування додаткових обмоток дросель-трансформаторів (ДТ), використання кабелю з підвищеним загасанням, підвищені довжини РК і кабелю. Рейкова лінія є колом з розподіленими параметрами. Особливістю цієї лінії є також наявність асиметричного витоку струму в землю та між рейками. Диференціальне рівняння рейкової лінії (РЛ) має вигляд лінійного рівняння з постійними коефіцієнтами, у якому аргументом є ордината лінії. Це рівняння дає можливість записати рішення через експоненціальні функції і привести їх до рівня передання чотириполюсника. Отже, можна зробити висновок, що розрахункова електрична схема заміщення ТРК-М – це послідовно включені в двопровідну лінію чотириполюсники з коефіцієнтами у вигляді  $A_i, B_i, C_i, D_i$  (рис. 2). Значення параметрів

чотириполюсника розраховується з Т(П)-подібних схем заміщення.

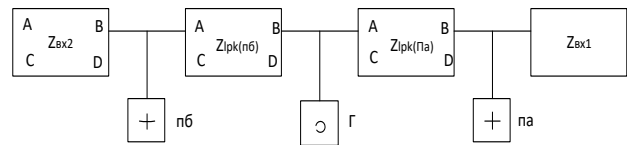


Рис. 2. Схема заміщення РК

Для рейкової лінії ці параметри знаходять шляхом розрахунку  $\gamma$  та  $Z_{\text{в}}$  – постійної розповсюдження та хвильового опору. Постійна розповсюдження  $\gamma$  і хвильовий опір  $Z_{\text{в}}$  залежать від опорів  $Z_{1,2}$  і  $R_{i3}$ , а коефіцієнти чотириполюсників – від окремих приладів та елементів лінії (трансформатори, фільтри, R, L, C). Отже, схема заміщення станційного рейкового кола матиме вигляд рис. 3.

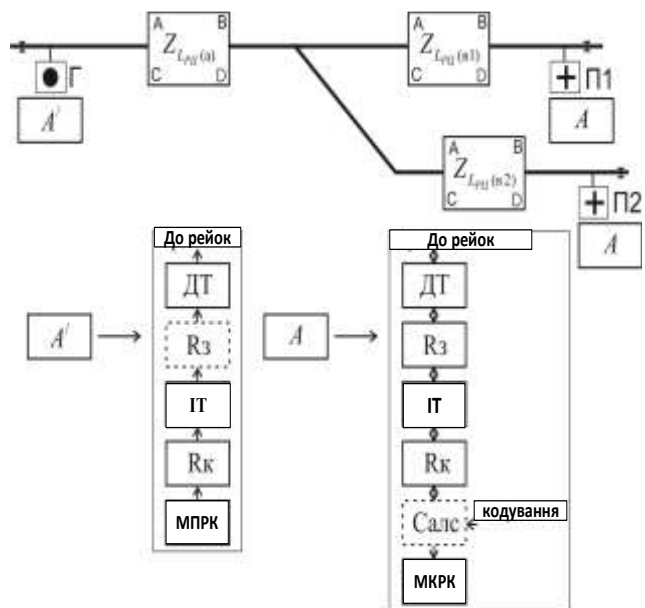


Рис. 3. Схема заміщення станційного РК

Схема заміщення перегінного РК матиме вигляд рис. 4.

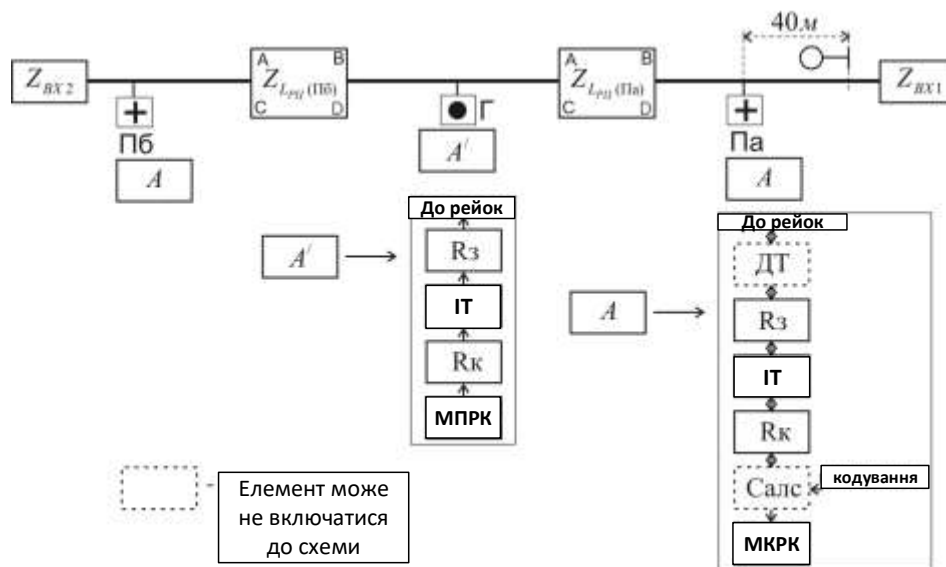


Рис. 4. Схема заміщення перегінного РК

Повна розрахункова схема заміщення РК матиме вигляд рис. 5.

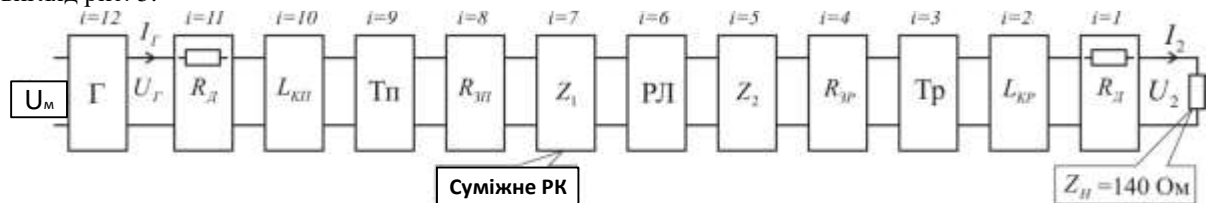


Рис. 5. Повна розрахункова схема заміщення РК

На вході ТРК-М встановлено генератор  $A^1$ , на виході - приймачі А. Для розрахунків мають бути задані струм і напруга на вхідному резисторі 20 Ом:  $I_{ВХ} = 3$  Ма,  $U_{ВХ} = 60$  мВ.

На розрахунковій схемі рис. 5 наведена повна структурна схема заміщення ТРК-М для перегону. На ній зображені чотириполосники вузлів принципової схеми перегінного РК:

$i=1$  – каскад додаткового опору релейного кінця  $R_d$  з коефіцієнтами чотириполосника  $A_1 = D_1 = 1, B_1 = R_d, C_1 = 0$ ;

$i=2$  – каскад з'єднувального кабелю рейкового кола РК з коефіцієнтами чотириполосника  $A_2 = D_2 = \cosh(\gamma_K L_{KP}), B_2 = Z_{BK} \sinh(\gamma_K L_{KP}), C_2 = \frac{\sinh(\gamma_K L_{KP})}{Z_{BK}}$ , де  $\gamma_K$  і  $Z_{BK}$  – вторинні параметри кабелю,  $L_{KP}$  – довжина кабелю;

$i=3$  – каскад трансформатора рейкового кола релейного кінця типу ПОБС-2А з коефіцієнтом трансформації  $n = 38$ .  $A_3, B_3, C_3, D_3$  відповідають частоті  $F_C$ ;

$i=4$  – каскад захисного опору рейкового кола,  $R_{ЗР} = 0,4$  Ом з коефіцієнтами чотириполосника ( $A_4 = D_4 = 1, B_4 = R_{ЗР}, C_4 = 0$ );

$i=5$  -  $Z_2$  – каскад вхідного опору суміжного рейкового кола з релейного кінця;  $Z_2 = \frac{0,4 \cosh(\gamma L_{CP}) + Z_B \sinh(\gamma L_{CP})}{0,4 \sinh(\gamma L_{CP}) / Z_B + \cosh(\gamma L_{CP})}$  3

коефіцієнтами чотириполосника  $A_5 = D_5 = 1, B_5 = 0, C_4 = 1/Z_2$ ;

$i=6$  – рейкова лінія ТРК-М з коефіцієнтами чотириполосника  $A_6 = D_6 = \cosh(\gamma_{PK} L_{PK}), B_6 = Z_6 \sinh(\gamma_{PK} L_{PK}), C_6 = \sinh(\gamma_{PK} L_{PK}) / Z_6$ ;

$i=7$  – каскад вхідного опору суміжного рейкового кола  $Z_1$  з живильного кінця, розраховується аналогічно  $i=5$ , тільки для суміжного рейкового кола;

$i=8$  – каскад захисного опору на живильному кінці РК;

$i=9$  – каскад трансформатора живильного кінця типу ПОБС-2А з коефіцієнтом трансформації  $n=38$ , коефіцієнти чотириполосника аналогічні  $i=3$ ;

**i=10** – каскад з'єднувального кабелю живильного кінця, коефіцієнти чотириполюсника аналогічні  $i=2$ ;

**i=11** – каскад додаткового опору  $R_d=100$  Ом при довжині кабелю  $L_K \leq 2$  км і  $R_d=0$  Ом при довжині кабелю  $L_K \geq 2$  км;

**i=12** – каскад генератора МПРК-1, який встановлюється за двонитковим планом станції або перегону.

#### Особливості розрахунку нормального режиму ТРК-М

Розрахунок нормального режиму ТРК-М полягає в отриманні напруги, струму та потужності генератора для рейкової лінії довжиною  $L_{1,2}$  по обидва боки від ординати підключення генератора. Розрахунок виконується при мінімальному опорі ізоляції РЛ. Результатом розрахунків є параметри генератора: струм  $I_1$ , напруга  $U_1$  і потужність  $S_1$  при

$$Z_{BX} = (0,4 \cdot \cosh(\gamma l_c) + z_B \cdot \sinh(\gamma l_c)) / \left( 0,4 \cdot \frac{\sinh(\gamma l_c)}{z_B} + \cosh(\gamma l_c) \right)$$

де  $\gamma l_c$  – аргумент гіперболічних функцій суміжних РЛ довжиною  $l_c$ .

Розрахунок електричних параметрів ТРК-М  $U_{\Gamma}$ ,  $U_{III}$  проводять з урахуванням заданої зони шунтування 40 м шляхом розрахування мінімального опору ізоляції  $R_{u \min}$ , при якому струм у приймачі не зменшиться менше надійного знеструмлення колійного приймача. При цьому мінімальна напруга на вході колійного приймача досягне значень 0,75...1,0 В, тобто 1,05...2,5  $U_{III \min}^H$  від розрахункового 0,4 В, а максимальна напруга на колійному приймачі не має перевищувати 1,35...1,45 В.

#### Особливості розрахунку шунтового режиму ТРК-М

Схема заміщення РК для шунтового режиму відрізняється від схеми заміщення РК у нормальному режимі тільки наявністю поїзного шунта. При цьому необхідно задати несучу частоту, довжину РК, довжини суміжних РК з релейного та живильного кінців. У цьому режимі потрібно знайти максимально допустиму напругу генератора при  $R_u = 50$

$Ом \cdot км$  і визначити коефіцієнт шунтової чутливості  $K_{III} = \frac{U_{\Gamma \max}}{U_{\Gamma \min}} \geq 1$ , де  $U_{\Gamma \min}$  – розрахункова

напруга генератора при мінімальному опорі ізоляції нормального режиму та максимальній напрузі

мінімальній напрузі на вході приймача. Далі потрібно визначити вихідні параметри генератора МПРК ( $I_H$ ,  $U_H$ ,  $S_H$ ) при максимальному опорі ізоляції  $R_u = 50$   $Ом \cdot км$  (напруга і струм на виході схеми заміщення залишаються незмінними). Для визначення максимальної напруги на виході схеми заміщення необхідно розрахувати напругу генератора  $U_1$ , яка при  $R_{u \max}$  завжди буде меншою, ніж  $U_1$ , при  $R_{u \min}$ , і

$$\text{коефіцієнт } K_{\Gamma} = \frac{U_{\Gamma(t_{u \min})}}{U_{\Gamma(t_{u \max})}}$$

Особливістю розрахунків нормального режиму для перегінних безстикових РК ТРК-М є необхідність урахування вхідних опорів суміжних РК:

$$Z_{BX} = (0,4 \cdot \cosh(\gamma l_c) + z_B \cdot \sinh(\gamma l_c)) / \left( 0,4 \cdot \frac{\sinh(\gamma l_c)}{z_B} + \cosh(\gamma l_c) \right)$$

генератора при максимальному опорі ізоляції при шунтовому режимі.

При розрахунках шунтового режиму всі коефіцієнти схем живильного і релейного кінців зберігаємо такими, як і при нормальному режимі, РЛ заміщується опорами рейок та ізоляції  $R_u = 50$   $Ом \cdot км$ , вхідний опір суміжних РК дорівнює 999 Ом або 0,06 Ом залежно від ординати поїзного шунта.

Напругу генератора  $U_{Gu}$  визначаємо при  $R_u = 50$   $Ом \cdot км$ . Розрахунковий струм приймача  $I_{Gu} = I_{III} \cdot K'_B = 0,00174$  А. Цей струм гарантує надійну фіксацію зайнятості РЛ.  $K'_B = 0,6$  –

коефіцієнт звороту, який визначає необхідний ступінь зменшення струму приймача, щоб надійно зафіксувати зайнятість РК. При цьому необхідно перевіряти допустиме значення напруги при шунтуванні РК і на живильному, і на релейному кінцях, як розрахункове значення  $K_{III}$  беруть його менше значення. Розрахунки показують, що менше

значення  $K_{III}$  на живильному кінці і вирівнювання цих величин здійснюють з урахуванням у розрахунках опору кабелю і захисних опорів. Вхідний опір апаратури по кінцях РК не має перевищувати 0,5 Ом. Допустимі значення джерела живлення на виході модуля МПРК у цьому режимі визначають шляхом послідовних розрахунків напруг і струмів на входах чотириполюсників каскадної схеми заміщення. У цілому розрахунок шунтового режиму полягає в розв'язанні рівняння за схемою заміщення

$$K_{III} = \frac{K'_{BH} \cdot Z_{no\ min}}{Z_{no\ max}}, \text{ де } K'_{BH} = \frac{K_{BH}}{K_u} -$$

приведений коефіцієнт надійного звороту колійного приймача,  $Z_{no\ max}$  і  $Z_{no\ min}$  – опір передавання основної схеми заміщення в нормальному і шунтовому режимах.

### Особливості розрахунку контрольного режиму ТРК-М

Схема заміщення РК для контрольного режиму аналогічна схемі для нормального режиму, але вона не містить вхідних опорів суміжних рейкових кіл через те, що їхній вплив враховується коефіцієнтами чотириполюсника рейкової лінії. Контрольний режим визначається чутливістю РК до обриву рейкової лінії або елементів РК, яка визначається відношенням

$$K_K = I_{III\ O} / I_{III\ \Phi},$$

де  $I_{III\ O}$  – струм відпускання якоря колійного приймача модуля МКРК;

$I_{III\ \Phi}$  – струм, який протікає через вхідний опір модуля при зламі рейки. Струм  $I_{III\ O}$  відомий, він складає 1,8 мА, а струм  $I_{III\ \Phi}$  розраховується рівнянням

$$I_{III\ \Phi} = \left| U_{\Gamma\ max} / (A_{\text{э}} \cdot Z_{BxIII} + B_{\text{э}}) \right|,$$

де  $A_{\text{э}}, B_{\text{э}}$  – коефіцієнти чотириполюсника, еквівалентні трьом чотириполюсникам, з'єднаним послідовно (рейкового і двох апаратних по кінцях рейкового кола).

За контрольним режимом розраховується максимально допустима напруга генератора при критичному значенні опору ізоляції і критичному місці обриву рейкової лінії. Ці параметри розраховуються послідовно за виразами для коефіцієнтів чотириполюсника для контрольного режиму з кроком розрахунків  $R_{\Gamma} = 0,05$  Ом км при різних поєднаннях опору ізоляції та місця обриву РЛ. Розрахунки виконуються до тих пір, поки залежність

$U_{\Gamma}(r_u, L_{1,2} = \text{var})$  не набуде мінімального значення. При знайдених критичному опорі ізоляції та ординатах місця обриву розраховують коефіцієнти чотириполюсника і відшукують допустиму величину напруги генератора для контрольного режиму.

### Висновки

Аналіз комплексу документації та досвід експлуатації розглянутих у статті МРК показали, що вона відповідає вимогам чинної нормативної бази в залізничній галузі. Проектні рішення і технічні

засоби, розглянуті в цій статті, можуть забезпечити реалізацію різних виконань МРК, які відповідають усім вимогам документів [2-8], що підтверджено матеріалами різних видів випробувань і промисловою експлуатацією на залізничних об'єктах України. Застосування уніфікованих технічних рішень і засобів, розширена діагностика зменшують витрати на експлуатацію МРК, забезпечують простоту і зручність обслуговування з мінімальними витратами. Наявність вбудованих засобів діагностики дає змогу оперативно локалізувати місце пошкодження, скоротити час на їхній пошук та усунення, що в умовах експлуатації істотно знижує час перебою в русі поїздів. Виявлення передвідмовних станів дає змогу експлуатаційному штату своєчасно здійснювати попереджувальні ремонти і обслуговування, тим самим скорочуючи кількість можливих відмов. Наявність у МРК цифрового інтерфейсу для ув'язки з мікропроцесорними системами автоматики і релейного інтерфейсу забезпечує можливість роботи з релейними системами, дає змогу застосовувати МРК у складі різних систем практично без обмежень.

### Список використаних джерел

1. Бунчуков О. А. Майбутнє починається сьогодні. URL: <https://mautic.appau.org.ua/asset/29:uzno27-2832-33pdf>.
2. Основные принципы определения необходимой надежности устройств СЦБ. ОСЖД. Варшава, 2010. URL: <https://osjd.org/api/media/resources/6384>.
3. Эксплуатационно-технические требования к системам интервального регулирования движения поездов на перегонах. ОСЖД. Варшава, 2016. URL: <https://osjd.org/api/media/resources/11925>.
4. ДСТУ 4178-2003. Комплекси технічних засобів. Системи керування та регулювання руху поїздів. Функційна безпечність і надійність. [Чинний від 2003-07-01.]. Вид. офіц. Київ, 2003. 35 с. URL : [https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id\\_doc=99396](https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=99396)
5. Розгонов А. П. Мікропроцесорна централізація стрілок та сигналів. Мікропроцесорні рейкові кола тональної частоти на станціях та перегонах при електротязі змінного струму: звіт з науково-дослідницької теми. № 421418.001 TP- 001.
6. EN 50126-1:1999. Railway applications. The specification and demonstration of reliability, availability, maintainability and safety (RAMS). Basic requirements and generic process.
7. CLC/TR 50126-2:2007. Railway applications. The specification and demonstration of reliability, availability, maintainability and safety (RAMS). Guide to the application of EN 50126-1 for safety.
8. EN 50128-2001: Railway applications. Communications, signalling and processing systems. Software for railway control and protection systems.
9. EN 50129:2019. Railway applications. Communication, signalling and processing systems. Safety related electronic systems for signalling.

**ANALYSIS OF DESIGN SOLUTIONS OF  
MICROPROCESSOR SYSTEM OF RAIL  
CIRCUITS**

Panchenko S. V., professor, Bunchukov O. A., Sotnyk V.  
O., associate professor

<https://orcid.org/0000-0002-7626-9933>.

**Panchenko Sergii**, *Doctor of sciences  
(engineering), Full Professor, Rector of Ukrainian State  
University of Railway Transport, Kharkiv, Ukraine.*

*E-mail:* [panchenko074@ukr.net](mailto:panchenko074@ukr.net)

<https://orcid.org/0000-0002-7626-9933>.

**Відомості про авторів**

Бунчуков О. А., департамент автоматика та  
телекомунікацій Укрзалізниці.

Bunchukov O. A., Department of Automation and  
Telecommunications of Ukrzaliznytsia.

Панченко Сергій Володимирович, *доктор  
технічних наук, професор, ректор Українського  
державного університету залізничного транспорту,  
Харків, Україна.*

*E-mail:* [panchenko074@ukr.net](mailto:panchenko074@ukr.net)

Сотник В. О., к.т.н., доцент, кафедра АТ,  
Український державний університет залізничного  
транспорту.

Sotnyk V. O., Ph.D. Associate Professor,  
Department of JSC, Ukrainian State University of  
Railway Transport.

АНАНЬЄВА О. М., д.т.н., професор, (Український державний університет залізничного транспорту)

БАБАЄВ М. М., д.т.н., професор, (Український державний університет залізничного транспорту)

ДАВИДЕНКО М. Г., к.т.н., доцент, (Український державний університет залізничного транспорту)

ПАНЧЕНКО В. В., к.т.н., доцент (Український державний університет залізничного транспорту)

## Частотна локалізація та оцінювання параметрів сигналу тестування обмотки статора трифазного асинхронного двигуна

*Ефективна експлуатація електричного рухомого складу залізниць можлива тільки за умови підтримання достатньо доброго технічного стану тягових електродвигунів, зокрема трифазних асинхронних.*

*Важлива складова відповідних заходів – вимірювання електричних параметрів обмоток статора шляхом подання тестового сигналу. Точність вимірювань погіршують завадові струми в цій обмотці. Для її підвищення, а відтак – більш точного визначення технічного стану двигуна, необхідно науково обґрунтувати умови, сприятливі для проведення вказаних вимірювань. У роботі визначено діапазон частот тягового струму, вільний від завад, які мають місце в стаціонарному робочому режимі тягового трифазного асинхронного двигуна. Запропоновано обирати вид і параметри сигналу так, щоб його спектр розташовувався в цьому діапазоні. Розроблено математичну процедуру оцінювання параметрів тестового сигналу з урахуванням залишкових завад, розташованих у визначеному діапазоні частот. Використано методи спектрального аналізу завадових сигналів, а також метод оцінювання параметрів за критерієм найменших середніх квадратів. Шляхом комп'ютерного моделювання прикладу використання синусоїдного тестового сигналу з відомою частотою визначено точнісні характеристики такого оцінювання в широкому діапазоні амплітуд імпульсної завади і ступеня перекриття сигналу та завади в часі.*

**Ключові слова:** трифазний асинхронний двигун, тестовий сигнал, завада, спектр, найменший середній квадрат.

### Вступ

Контроль електронних процесів і параметрів обмоток електродвигунів є основою технічно й економічно ефективної експлуатації електричного рухомого складу залізниць. Роботі контролюючих пристроїв заважають електромагнітні впливи зовнішніх і внутрішніх відносно двигуна чинників, які суттєво спотворюють електричні коливання, що несуть контрольну інформацію. Це створює передумови для похибок у прийнятті рішень щодо стану обмоток. Зростає насиченість електрорухомого складу новими електронними пристроями – джерелами завад, а також урізноманітнюються використані в них електромагнітні коливання. Тому зростає й кількість завад роботі контролюючих пристроїв. Через це зростає актуальність вирішення завдання локалізації контрольного сигналу в завадовому оточенні та оцінювання інформаційних параметрів цього сигналу з урахуванням дії завад.

### Постановка проблеми і аналіз досліджень і публікацій

Електронні пристрої діагностики тягових асинхронних двигунів працюють в умовах складної електромагнітної обстановки, не орієнтованої на

знаходження в ній пристроїв, не пов'язаних із сильнострумівими процесами.

Однак потенційні вигоди від оперативного отримання інформації про технічний стан двигуна шляхом непрямого спостереження параметрів його електричних вузлів стимулюють роботи в напрямі дослідження впливу величин цих параметрів на параметри допоміжних слабкострумівих коливань, адитивно доданих до складу тягового струму. Маючи структуру та (або) параметри, що відрізняються від аналогічних показників тягового струму, ці внесені коливання забезпечують отримання додаткової інформації про технічний стан асинхронного двигуна. У роботі [1] розглянуто контроль міжвиткової ізоляції шляхом аналізу електричних процесів, які виникли при збудженні електричних дуг у місцях міжвиткових пробіів. Такий спосіб потребує застосування високовольтного тестового сигналу і не може бути застосований на двигуні, який знаходиться в робочому режимі. Підхід, близький до описаного, застосовано в роботі [2], але там запропоновано контролювати параметри обмотки шляхом контролю резонансної частоти контуру, побудованого на базі цієї обмотки. Практичні обмеження – ті самі, що й для результатів попередньої роботи.

Авторами статті [3] розглянуто можливість внесення в обмотку статора невеликого постійного струму для отримання ефектів, які несуть інформацію про активний опір і температуру цієї обмотки. Такий метод придатний для контролю працюючого двигуна, але його реалізація призводить до магнітного дисбалансу двигуна; власне, проблемам магнітного насичення статора ця стаття насамперед і присвячена. Викладений у роботі [4] метод базується на введенні в контрольовану обмотку низковольтного білого шуму. Кінцевим результатом вимірювань є передатна функція двообмоткового трансформатора, яку важко інтерпретувати в сенсі конкретних числових значень електричних параметрів обмотки. У роботі [5] розглянуто введення височастотного тестового сигналу в обмотку статора вентиляного електродвигуна. Дослідження зосереджене на проблемах, пов'язаних з обертальним моментом двигуна і не містить завдання тестування обмотки. Контроль температури обмотки статора двигунів останнього зазначеного типу розглянуто в роботі [6]. Основні зусилля зосереджені на інтерпретації результатів вимірювання та недопущенні впливу тестового сигналу на обертальний момент. Можливі електромагнітні завади вимірюванням не розглянуто, що залишає відкритим питання про раціональний вибір діапазону частот сигналу відносно діапазонів, перекритих такими завадами, тобто про раціональну частотну локалізацію тестового сигналу. Результати теоретичних і практичних досліджень застосування рефлектометрії для визначення місця розташування неоднорідностей обмотки трифазних електричних машин розглянуто в роботі [7]. Однак запропонована методика потребує попереднього препарування машини і тому непридатна для застосування на працюючій машині. Також зазначимо, що в усіх розглянутих роботах діє неявне припущення, що спостереження тестових сигналів відбувається за відсутності їхнього спотворення заводовими компонентами тієї самої фізичної природи. Ці спотворення призводять до відхилень результатів спостереження від таких, що описують реальний стан обмотки та двигуна в цілому. Раніше це було проблемою, притаманною радше галузям зв'язку та автоматики, у яких було створено багато напрацювань, що забезпечували її вирішення з прийнятними результатами (див., наприклад, огляд у роботі [8]). Але поширення цих напрацювань на спостереження тестових сигналів в електродвигунах потребує дуже суттєвих зусиль.

Отже, розроблені на сьогодні методи і засоби контролю обмоток з використанням тестових сигналів забезпечують моніторинг їхніх основних параметрів. Але не вдалося виявити опублікованих розробок, у яких було б обґрунтовано вибір частотного діапазону для розташування тестового сигналу з урахуванням заводового електромагнітного середовища працюючого трифазного асинхронного двигуна та одночасно розглянуто питання вимірювання параметрів цього сигналу з урахуванням завод. Вирішення такого завдання забезпечило б підвищення

точності та оперативності діагностування обмоток двигунів вказаного типу.

### Мета та задачі дослідження

Мета дослідження – науково обґрунтоване визначення сприятливих умов вимірювання параметрів тестового сигналу, адитивно доданого до складу тягового струму трифазного асинхронного двигуна з метою непрямого контролю параметрів його електричних вузлів у процесі штатної роботи цього двигуна. Для досягнення поставленої мети було вирішено два завдання:

1) визначення діапазону частот тягового струму, вільного від спектральних складових цього струму, притаманних трифазному асинхронному двигуну в робочому режимі (частотна локалізація тестового сигналу);

2) розроблення математичної процедури оцінювання параметрів тестового сигналу з урахуванням залишкових завод, розташованих у визначеному діапазоні частот.

### Основна частина

#### Визначення складу комплексу завод і частотна локалізація тестового сигналу

Нехай у якійсь з фаз обмотки статора трифазного асинхронного двигуна присутній штучно введений туди тестовий сигнал у вигляді струму з постійними параметрами. Потужність цього сигналу вважатимемо настільки малою, що він(вона) не впливає на обертальний момент двигуна. Інтервал спостереження  $[T_1, T_2]$  струмових процесів в обмотці вважатимемо достатньо малим, щоб протягом нього параметри тягового струму теж були постійними. Сам цей тяговий струм утворений шляхом широтно-імпульсної модуляції (ШІМ) імпульсів постійної амплітуди.

За цих умов струм фази є сумою кількох складових:

1. Постійна складова  $I_0$ . Її може й не бути при живленні двигуна двополярною ШІМ-напругою.

2. Власне живильна синусоїдна складова  $i_{sp}(t)$ .

3. Псевдопилкоподібна різниця  $i_{ges}(t)$  між результатом інтегруючого перетворення ШІМ-напруги в струм  $i_{out}(t)$  фазної обмотки і струмом  $i_{sp}(t)$ .

4. Складова  $i_{tr}(t)$ , викликана зубцевими гармоніками.

5. Імпульсна завада  $i_p(t)$ , викликана короткочасними процесами в живильній мережі (втрата контакту пантографа, наведення від грозових розрядів).

У підсумку струм однієї фази можна записати як

$$i(t) = s(t) + I_0 + i_{sp}(t) + i_{ges}(t) + i_{tr}(t) + i_p(t). \quad (1)$$

Кожне з коливань, що міститься в лівій частині виразу (1), характеризується не тільки виглядом часової залежності, але й індивідуальною сукупністю параметрів, об'єднаною у вектор  $\vec{\lambda}$ . У подальшому будемо вважати, що постійну складову  $I_0$  відфільтровано, або вона була відсутня з самого

початку (як при двополярній ШІМ). З урахуванням зазначеного вираз (1) набуває вигляду

$$i(t) = s(t, \vec{\lambda}_s) + i_{sp}(t, \vec{\lambda}_{sp}) + i_{ges}(t, \vec{\lambda}_{ges}) + i_{tr}(t, \vec{\lambda}_{tr}) + i_p(t, \vec{\lambda}_p). \quad (2)$$

Індекси при векторах параметрів повторюють індекси параметризованих струмів.

Живильний струм  $i_{sp}(t, \vec{\lambda}_{sp})$  є синусоїдою з частотою  $f_{sp}$ , яка на практиці лежить у межах 2...60 Гц. Протяжність відрізка цієї синусоїди, який надходить під час спостереження, дорівнює  $(T_2 - T_1)$  секунд. Відомо, що 95 % потужності такого відрізка (прямокутного імпульсу з синусоїдним заповненням)

лежить у межах від  $\left(f_{sp} - \frac{2}{T_2 - T_1}\right)$  до

$\left(f_{sp} + \frac{2}{T_2 - T_1}\right)$  Герц [9, 10]. Якщо  $T_2 - T_1 = 1$  с, то

нижньою межею ефективного спектра сигналу буде 0

при  $f_{sp} = 2$  Гц, а верхньою межею буде 62 Гц при  $f_{sp} = 60$  Гц.

Струм  $i_{ges}(t, \vec{\lambda}_{ges})$  псевдопилкоподібної компоненти – це результат інтегрування живильної ШІМ-напруги індуктивно-резистивною фазною обмоткою. Оскільки інтегрування фізично відповідає низькочастотній фільтрації, то ширина смуги частот струму є меншою за ширину смуги частот напруги, що викликає цей струм. Отже, розрахунок ширини смуги частот напруги є розрахунком «на найгірший випадок». Ескіз спектра ШІМ-напруги подано на рис. 1. На ньому як  $f_c$  позначена частота несучого пилкоподібного коливання ШІМ.

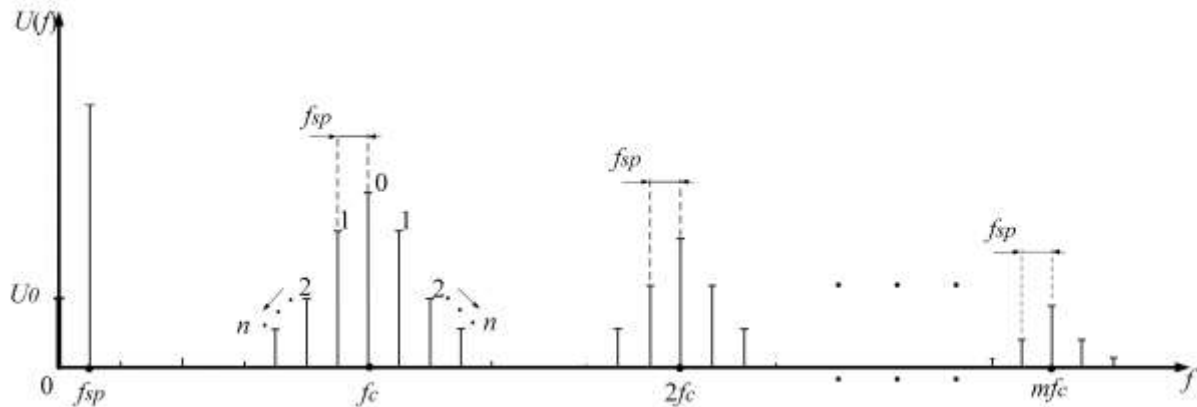


Рис. 1. Спектр ШІМ-напруги

Амплітуди гармонік змінюються за законом  $\frac{1}{m} \cdot J_n(0,5\pi mM)$  [11], де  $J_n(x)$  –

функція Бесселя  $n$ -го порядку;  $M$  – індекс модуляції ШІМ;  $m$  – номер пелюстки спектра. Вважатимемо, що  $f_c = 20$  кГц,  $M = 0,9$  (типове практичне сполучення в електроприводі) і зробимо розрахунок гармонік для  $m = 1$  (тобто першої пелюстки спектра). При цих початкових даних  $x = 0,5\pi mM \approx 1,41$

отримуємо, що  $J_0(x) \approx 0,567$ ;

$J_1(x) \approx 0,544$ ;  $J_2(x) \approx 0,210$ ;

$J_3(x) \approx 0,052$ ;  $J_4(x) \approx 0,009$ ;

$J_5(x) \approx 0,001$ . Із зростанням  $n$  величини

$J_n(x)$  зменшуються все більше. Зупинимося на врахуванні перших п'яťох бічних ліній спектра: урахуємо афілійовані з першою бічною пелюсткою гармоніки з  $n = 0, \dots, 5$ . Виходячи з цього перша бічна

пелюстка лежить у межах  $[f_c - 5f_{sp}; f_c + 5f_{sp}]$  або [19640; 20360] Гц. Відстань між першою та другою пелюстками складає  $f_s = 20$  кГц. На цій відстані афілійовані з пелюстками гармоніки згасають до нехтувано малих величин. Крім того, через наявність

множника  $\frac{1}{m}$  амплітуди афілійованих з другою

пелюсткою гармонік ще у два рази менші. Бокові пелюстки з номерами більше 2 ще менш впливові. Отже, можна обґрунтовано вважати, що складова  $i_{ges}(t, \vec{\lambda}_{ges})$  займає діапазон частот від 19640 до 20360 Гц.

Тепер проаналізуємо наступний доданок формули (1) – струм  $i_{tr}(t, \vec{\lambda}_{tr})$ , викликаний зубцевими гармоніками. Його частота складає [13]

$$f_{tr} = \frac{f_{sp} \cdot z_2 (1-s)}{p} \pm l f_{sp}, \quad (3)$$

де  $f_{sp}$  – частота живильної напруги;  $z_2$  – кількість зубців ротора;  $s$  – ковзання;  $p$  – кількість пар полюсів;  $l$  – ціле непарне число – номер гармоніки зубцевого струму. Прийнемо типові для тягових двигунів числові значення  $f_{sp} = [20 \dots 60]$  Гц;  $z_2 = 40$ ;  $p = 3$ ;  $s = 0,05$ . При таких даних маємо  $f_{sp} = (25,4 \dots 762) \pm (2 \dots 60) \cdot l$ ,  $l = 1, 3, 5, 7, \dots$  Ураховуючи гармоніки включно по 17-ту,

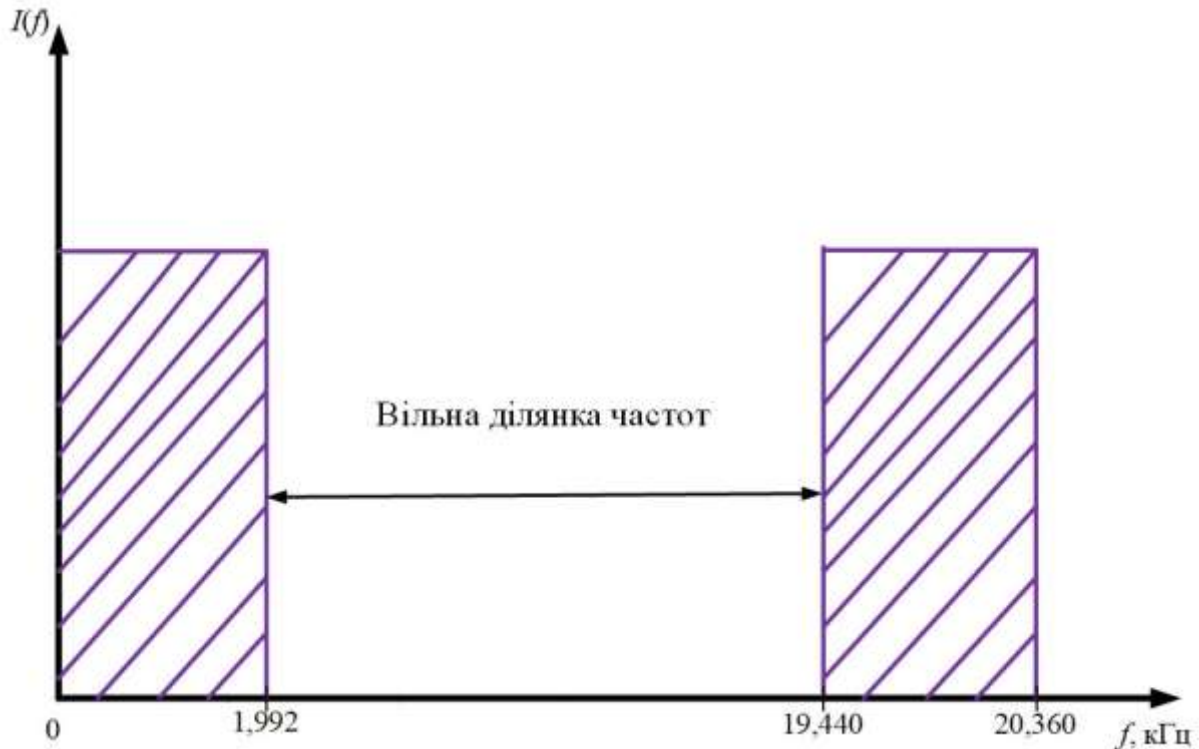


Рис. 2. Зайнятість частотної області завдовжки струмами

Тобто можна вважати вільною від дії цих двох компонентів ділянку частот від 2 до 19 кГц.

Імпульсна завада  $i_p(t, \vec{\lambda}_p)$  утворена процесами, які можуть бути дуже короткочасними. Однак через інерційність індуктивно-резистивного кола фазної обмотки протяжність цієї завади не може бути менше сталої часу цього кола. Наприклад, для тягового двигуна АД-914У параметри цього кола складають [14]  $R = 0,0226$  Ом,  $L = 0,68 \cdot 10^{-3}$  Гн. Відповідна величина сталої часу  $\tau = L/R \approx 0,03$  с. Спектр імпульсу, протяжність якого обмежена знизу цією величиною, лежить у межах від 0 до  $1/\tau \approx 33$  Гц. Однак при виникненні несправностей величина  $L$  може багатократно зменшуватися, а  $R$  – багатократно збільшуватися. Тому можливу верхню частоту спектра імпульсної завади слід вважати дуже великою – у сотні разів більше ніж 33 Гц.

Підсумок аналізу зайнятості частотної області завдовжки струмами такий. Струми  $I_0$ ,  $i_{sp}(t, \vec{\lambda}_{sp})$ ,

отримано, що частоти зубцевих гармонік лежать від 0 (при  $l = 12$ ) до 1992 Гц.

Отже, узагальнення цих компонентів  $i_{ges}(t, \vec{\lambda}_{ges})$  і  $i_{tr}(t, \vec{\lambda}_{tr})$  призводить до діаграми зайнятості частотної області, поданої на рис. 2.

$i_{ges}(t, \vec{\lambda}_{ges})$ ,  $i_p(t, \vec{\lambda}_p)$  займають обмежені діапазони частот  $0 \dots 2$  кГц і  $19,64 \dots 20,36$  кГц. Великий проміжок між цими діапазонами дає змогу повністю відфільтрувати ці завади при первинній обробці струму  $i(t)$ , наприклад, шляхом виконання перетворення Фур'є та обнулення частотних відліків у вказаних діапазонах зосередження завад. Діапазон від 2 до 19 кГц вільний від усіх завад, окрім імпульсної. У ньому доцільно розмістити (локалізувати) тестовий сигнал (можна і вище 20,36 кГц, але зі зростанням частоти збільшується й опір індуктивно-ємнісного кола фази, і для отримання прийнятної величини сигналу  $s(t, \vec{\lambda}_s)$  знадобиться й більша потужність генератора цього сигналу).

#### Оцінювання параметрів тестового сигналу

Отже, після частотної локалізації сигналу та видалення всіх компонент струму, що знаходяться поза діапазоном локалізації, вираз (2) для струму, що надходить до вимірювального пристрою, набуває вигляду

$$i(t) = s(t, \vec{\lambda}_s) + i_p(t, \vec{\lambda}_p). \quad (4)$$

Але при вимірюванні доступна лише величина  $i(t)$  лівої частини цієї рівності. Щоб визначити величини параметрів правої частини за такою інформацією, необхідно ввести до розгляду модель  $\hat{i}(t)$  струму  $i(t)$ :

$$\hat{i}(t) = s(t, \vec{\lambda}_s) + i_p(t, \vec{\lambda}_p) = \hat{s}(t) + \hat{i}_p(t),$$

де  $\vec{\lambda}_s$  та  $\vec{\lambda}_p$  – вектори оцінок параметрів реального струму, підбором яких досягається найкраща за певним критерієм схожість часових залежностей  $i(t)$  та  $\hat{i}(t)$ . Як такої критерій використано найменший середній квадрат відхилення струмів  $i(t)$  та  $\hat{i}(t)$  один від одного. На цьому критерії базується відомий метод оцінювання – метод найменших квадратів [15], за яким у розглянутому випадку оцінки  $\vec{\lambda}_s$  та  $\vec{\lambda}_p$  є такими, що мінімізують середню потужність струму похибки в резисторі опором 1 Ом:

$$\varepsilon_n = \frac{1}{T_2 - T_1} \cdot \int_{T_1}^{T_2} [i(t) - \hat{i}(t)]^2 dt.$$

Вважатимемо, що спостереження здійснюється в дискретні моменти часу  $t_k = (k-1) \cdot \Delta t$ , де  $k = 1, \dots, K$ . Ці моменти розташовані з однаковим інтервалом  $\Delta t$ . За таких умов вираз (6) набуває вигляду

$$\varepsilon_K = \frac{1}{K-1} \cdot \sum_{k=1}^K (i_k - \hat{i}_k)^2,$$

де  $i_k$  та  $\hat{i}_k$  – відліки відповідно струму  $i(t)$  та  $\hat{i}(t)$ . Помноживши обидві частини на  $(K-1)$ , виникає необхідність мінімізації величини

$$\varepsilon^2 = \sum_{k=1}^K (i_k - \hat{i}_k)^2.$$

Після піднесення до квадрата маємо

$$\varepsilon^2 = \sum_{k=1}^K (i_k^2 - 2i_k \hat{i}_k + \hat{i}_k^2) = \sum_{k=1}^K i_k^2 - 2 \sum_{k=1}^K i_k \cdot \hat{i}_k + \sum_{k=1}^K \hat{i}_k^2.$$

Урахувавши вираз (5), отримаємо

$$\varepsilon^2 = \sum_{k=1}^K i_k^2 - 2 \sum_{k=1}^K i_k \cdot \hat{s}_k - 2 \sum_{k=1}^K i_k \hat{i}_{pk} + \sum_{k=1}^K \hat{s}_k^2 + \sum_{k=1}^K \hat{i}_{pk}^2 + 2 \sum_{k=1}^K \hat{s}_k \cdot \hat{i}_{pk}$$

Перший доданок цього виразу є постійною величиною для конкретної вибірки спостережень, тому не впливає на процес мінімізації. З урахуванням цього виникає необхідність мінімізації величини

$$\delta = \sum_{k=1}^K \hat{s}_k^2 - 2 \sum_{k=1}^K i_k \cdot \hat{s}_k + \sum_{k=1}^K \hat{i}_{pk}^2 - 2 \sum_{k=1}^K i_k \cdot \hat{i}_{pk} + 2 \sum_{k=1}^K \hat{s}_k \cdot \hat{i}_{pk}$$

Позначення  $\varepsilon^2$  замінене на  $\delta$ , оскільки видалення першого доданка виразу (8) може призвести до від'ємних значень його правої частини, яка вже не є квадратом похибки. Але  $\delta$  має мінімум у тій самій точці простору параметрів. Вираз (9) надає дві можливості для подальшої величини  $\delta$  (цільової функції). Вони залежать від підходу до подання імпульсної завади. Перший підхід полягає в уявленні цієї завади як широкосмугового випадкового процесу з нульовою середньою величиною. Цей процес не містить параметрів, які підлягають оцінюванню, і не є корельованим із сигналом. За цих умов останні три доданки виразу (9) не впливають на положення мінімуму цільової функції в просторі параметрів і можуть бути видалені з виразу для цільової функції, яка в цьому випадку набуває вигляду

$$\delta = \sum_{k=1}^K \hat{s}_k^2 - 2 \sum_{k=1}^K i_k \cdot \hat{s}_k.$$

Другий підхід полягає в уявленні завади як структурно-детермінованої функції часу, яка залежить від деякої сукупності параметрів, згрупованих у вектор параметрів  $\vec{\lambda}_p$ . Величини цих параметрів визначають часову залежність миттєвої величини завади в конкретній спостережній реалізації. За такого підходу задача оцінювання параметрів сигналу перетворюється на задачу сумісного оцінювання параметрів сигналу та завад. Точність отриманих оцінок суттєво залежатиме від того, наскільки детально прийнята структурно-детермінована модель завади здатна описувати будь-яку її реалізацію. При цьому підлягає мінімізації цільова функція в повній формі (9).

Розглянемо застосування першого з описаних підходів на прикладі тестового сигналу у вигляді

синусоїди з відомою частотою  $\omega$  та невідомими амплітудою  $I_{ms}$  та початковою фазою  $\varphi_s$ :

$$s(t, \vec{\lambda}_s) = I_{ms} \cdot \sin(\omega t + \varphi_s),$$

де вектором невідомих параметрів є  $\vec{\lambda}_s = \begin{pmatrix} I_{ms} \\ \varphi_s \end{pmatrix}$ .

Після дискретизації такого сигналу за часом маємо

$$s_k(\vec{\lambda}_s) = I_{ms} \cdot \sin[\omega \cdot (k-1)\Delta t + \varphi_s].$$

Після підстановки останнього виразу до формули (10) отримаємо

$$\begin{aligned} \delta(I_{ms}, \varphi_s) &= I_{ms}^2 \cdot \sum_{k=1}^K \sin^2[\omega \cdot (k-1)\Delta t + \varphi_s] - \\ &- 2I_{ms} \cdot \sum_{k=1}^K i_k \sin[\omega \cdot (k-1)\Delta t + \varphi_s]. \end{aligned}$$

Це квадратична функція параметра  $I_{ms}$ , а оскільки коефіцієнт при  $I_{ms}^2$  додатний, то точка рівності нулю першої похідної за  $I_{ms}$  – це точка мінімуму цільової функції за параметром  $I_{ms}$ :

$$I_{ms \min}(\varphi_s) = \frac{\sum_{k=1}^K i_k \cdot \sin[\omega(k-1)\Delta t + \varphi_s]}{\sum_{k=1}^K \sin^2[\omega(k-1)\Delta t + \varphi_s]}.$$

Підстановка цього виразу до цільової функції (12) зводить задачу мінімізації функції  $\delta(I_{ms}, \varphi_s)$  двох змінних до задачі мінімізації функції однієї змінної

$$\delta(\varphi_s) = I_{ms \min}^2(\varphi_s) \cdot \sum_{k=1}^K \sin^2[\omega(k-1)\Delta t + \varphi_s] -$$

$$- 2I_{ms \min}(\varphi_s) \cdot \sum_{k=1}^K i_k \cdot \sin[\omega(k-1)\Delta t + \varphi_s]$$

$$= - \frac{\left\{ \sum_{k=1}^K i_k \cdot \sin[\omega(k-1)\Delta t + \varphi_s] \right\}^2}{\sum_{k=1}^K \sin^2[\omega(k-1)\Delta t + \varphi_s]}.$$

Оскільки  $\sin^2 \alpha = 0,5(1 - \cos 2\alpha)$ , то знаменник виразу (14) можна записати у вигляді

$$\sum_{k=1}^K 0,5 - \sum_{k=1}^K 0,5 \cdot \cos[2\omega(k-1)\Delta t + 2\varphi_s].$$

Часовий інтервал спостереження ( $T_2 - T_1$ ) містить багато періодів косинусного коливання, тому друга сума набагато менша за першу, і з високою точністю вираз (14) можна записати як

$$\delta(\varphi_s) = - \frac{2}{K} \cdot \left\{ \sum_{k=1}^K i_k \cdot \sin[\omega(k-1)\Delta t + \varphi_s] \right\}^2 \quad (12)$$

Оцінкою початкової фази є

$$\hat{\varphi}_s = \arg \max \left\{ \sqrt{\frac{2}{K}} \cdot \sum_{k=1}^K i_k \cdot \sin[\omega(k-1)\Delta t + \varphi_s] \right\}$$

Щоб отримати кінцевий вираз для обчислення величини  $\hat{\varphi}_s$ , візьмемо похідну від змісту фігурних дужок формули (15) і прирівняємо її до нуля. Отримаємо таке співвідношення:

$$-\sin \hat{\varphi}_s \sum_{k=1}^K i_k \cdot \sin[\omega(k-1)\Delta t] + \cos \hat{\varphi}_s \sum_{k=1}^K i_k \cdot \cos[\omega(k-1)\Delta t] = 0 \quad (13)$$

звідки

$$\hat{\varphi}_s = \arctg \frac{\sum_{k=1}^K i_k \cdot \cos[\omega(k-1)\Delta t]}{\sum_{k=1}^K i_k \cdot \sin[\omega(k-1)\Delta t]}.$$

Для визначення точніших характеристик оцінювання параметрів тестового сигналу за співвідношеннями (13), (16), (17) і робочих меж співвідношення амплітуд тестового сигналу та імпульсу було виконане комп'ютерне моделювання сигналу, імпульсу та обробки їхньої адитивної суміші за вказаними співвідношеннями. Параметри сигналу:

$I_{ms} = 0,1$  А,  $f_s = 2500$  Гц,  $\varphi_s = 75^\circ$ , інтервал спостереження  $(T_2 - T_1) = 0,01$  с, інтервал дискретизації за часом  $\Delta t = 5 \cdot 10^{-5}$  с. Імпульсну заваду змодельовано як послідовність статистично незалежних відліків гаусівської випадкової величини з середнім квадратом відхилення  $0,005$  А і нульовим середнім значенням, промодульовану за амплітудою обвідною кривою  $A \cdot t \cdot e^{-\gamma t}$ , підтвердженою експериментальними дослідженнями [16]. Параметри  $A$  та  $\gamma$  цієї кривої при кожному моделюванні були підібрані так, щоб забезпечити задану амплітуду  $I_p$  і протяжність  $\tau_p$  імпульсу завади. Змодельовані три варіанти протяжності цього імпульсу  $\tau_p = T_2 - T_1$ ,  $\tau_p = 0,5(T_2 - T_1)$  і  $\tau_p = 0,125(T_2 - T_1)$ . Обчислено середньоквадратичні похибки  $\sigma_I$  оцінки амплітуди сигналу та  $\sigma_\varphi$  оцінки початкової фази сигналу. Результати моделювання зведено до табл. 1-3.

Таблиця 1  
Похибки оцінок при  $\tau_p = T_2 - T_1$

$I_p$ , А	0,01	0,10	0,20	0,40	0,60	0,80	1,00	2,00	10
$\sigma_I$ , А	$4,01 \cdot 10^{-4}$	$4,01 \cdot 10^{-3}$	$7,9 \cdot 10^{-3}$	0,016	0,023	0,031	0,038	0,067	0,459
$\sigma_\varphi$ , °	0,21	2,1	4,01	8,1	11,7	15,8	19,1	31	72,9

Таблиця 2  
Похибки оцінок при  $\tau_p = 0,5(T_2 - T_1)$

$I_p$ , А	0,01	0,10	0,20	0,40	0,60	0,80	1,00	2,00	10
$\sigma_I$ , А	$2,1 \cdot 10^{-4}$	$2,1 \cdot 10^{-3}$	$4,39 \cdot 10^{-3}$	$8,82 \cdot 10^{-3}$	0,013	0,018	0,022	0,046	0,245
$\sigma_\varphi$ , °	$0,078$	$0,776$	1,603	3,14	4,53	6,10	7,49	14,68	56,04

Таблиця 3  
Похибки оцінок при  $\tau_p = 0,125(T_2 - T_1)$

$I_p$ , А	0,01	0,10	0,20	0,40	0,60	0,80	1,00	2,00	10
$\sigma_I$ , А	$5,6 \cdot 10^{-5}$	$5,84 \cdot 10^{-4}$	$1,15 \cdot 10^{-3}$	$2,29 \cdot 10^{-3}$	$3,51 \cdot 10^{-3}$	$4,8 \cdot 10^{-3}$	$6,18 \cdot 10^{-3}$	0,013	0,078
$\sigma_\varphi$ , °	$0,067$	$0,689$	1,351	2,64	3,99	5,36	6,75	12,93	60,2

На рис. 3 і 4 зображено графіки залежностей  $\sigma_I(I_p)$  і  $\sigma_\varphi(I_p)$ , відповідні результатам розрахунку, наведених у табл. 1-3.

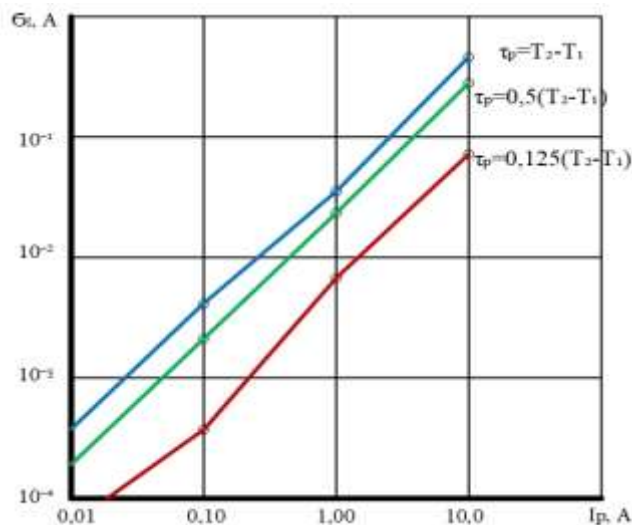


Рис. 3. Середньоквадратична похибка оцінки амплітуди сигналу

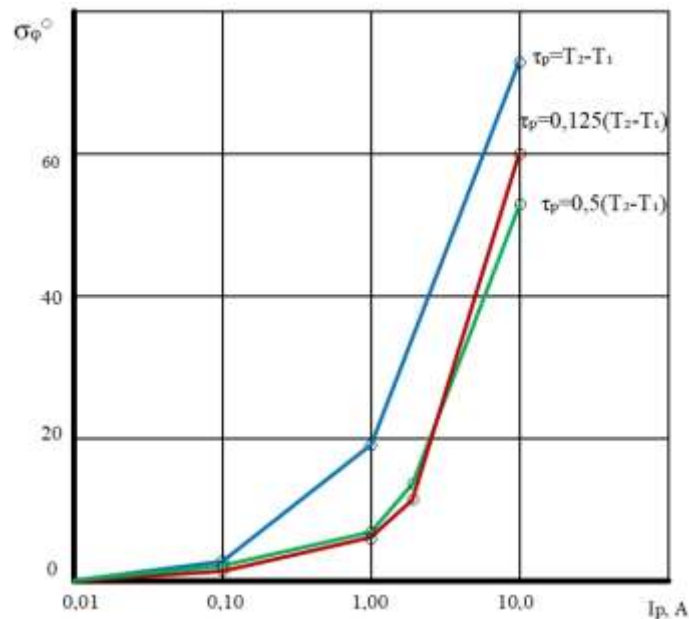


Рис. 4. Середньоквадратична похибка оцінки початкової фази сигналу

Як показали результати моделювання, розроблена математична процедура оцінювання параметрів тестового сигналу забезпечує високу точність цього оцінювання в широких діапазонах інтенсивності імпульсної завади та перекриття сигналу і завади в часі.

#### Обговорення результатів частотної локалізації та оцінки параметрів тестового сигналу

Розглянуті питання стосуються відомої методології контролю електронних параметрів обмоток асинхронних електродвигунів шляхом введення в контрольоване коло спеціальних тестових сигналів. Однак результати цього дослідження надають обґрунтування вибору виду та параметрів тестових сигналів, чого не було розглянуто в попередніх роботах. Крім того, визначено процедуру обробки тестового сигналу, яка мінімізує вплив електромагнітних завад на оцінки параметрів цього сигналу. Це питання також не було розглянуто в попередніх роботах. Отже, результати цієї роботи визначають комплекс заходів з підвищення точності вимірювання електричних параметрів обмотки, а через це – підвищення точності діагностування технічного стану трифазного асинхронного електродвигуна. Розглянуто режим роботи двигуна з постійною частотою обертання ротора. Хоча такі умови і відповідають реальному режиму роботи двигуна на коротких інтервалах часу, але вони все ж таки не всеосяжні. Це є чинником, який обмежує застосовність отриманих результатів у різко нестационарних режимах роботи двигуна. Поширення проведеного обґрунтування на такі режими – напрям подальших досліджень.

#### Висновки

1. На базі аналізу електромагнітного оточення визначено склад комплексу завад, які створюють електричний фон для спостереження

тестового струму в обмотці трифазного асинхронного двигуна. Шляхом аналізу спектрального складу цих завад визначено діапазон частот, у якому їхня спектральна щільність найменша.

2. З урахуванням можливих варіантів часових залежностей залишкових завад розроблено математичну процедуру оцінювання параметрів тестового сигналу. Шляхом комп'ютерного моделювання випадку застосування синусоїдного тестового сигналу визначено точнісні характеристики цієї процедури в широкому діапазоні інтенсивності завади і ступеня перекриття сигналу і завади за часом.

#### Список використаних джерел

1. Prony Method Estimation as a New Approach for Surge Comparison Testing in Turn Insulation Diagnostics for Three Phase Stator Windings / L. A. T. Guajardo, L. H. R. Alfaro, J. R. Maldonado, M. A. G. Vazques, F. S. Salinas, M. Y. Shin. *Machines*. 2023. 11 (2), 241. URL : <https://doi.org/10.3390/machines11020241>.
2. A New Testing Method for the Diagnose of Winding Faults in Transformer / Z. Wu, L. Zhou, T. Lin, X. Zhou. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*. PP(99): 1-1. June 2020. DOI: 10.1109/TIM.2020.2998877.
3. Magnetic Effects of DC Signal Injection on Induction Motors for Thermal Evaluation of Stator Windings / P. Zhang, Y. Du, T. G. Habetler, B. Iu. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*. 58(5): 1479-1489. DOI: 10.1109/TIE.2010.2089935.
4. Investigations on using white noise as a test signal for performing frequency response

- measurements on transformer / S. Arumugam. *Electric Power Systems Research*. Vol. 202, January 2022, 107586. URL : <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2021.107586>.
5. Optimisation of HF signal injection parameters for EV applications based on sensorless IPMSM drives / L. Idkhajine, E. Monmasson, Z. Makni, P.-A. Chauvenet, B. Condamin, A. Bruyere. *IET Electric Power Applications*. Vol. 12, Issue 3. P. 347-356. URL : <https://doi.org/10.1049/iet-epa.2017.0228>.
  6. Signal injection method without torque ripple for stator winding temperature estimation of surface-mounted PMSM drive systems / J. Fang, S. Ding, Y. Sun, J. Hang. *Journal of Power Electronics*. November 2020. 20(6): 1504-1513. DOI:1007/s43236-020-00153-0.
  7. A Study of Frequency Domain Reflectometry Technique for High-Voltage Rotating Machine Winding Condition Assessment / J. Cheng, Y. Zhang, H. Yun, L. Wang, N. Taylor. *Machines*. 2023. 11 (9), 883. URL : <https://doi.org/10.3390/machines11090883>.
  8. Synthesis of a device for anti-jamming reception of signals of tonal rail circuits on the background of additive five-component interference / S. Panchenko, O. Ananieva, M. Babaiev, M. Davidenko, V. Panchenko. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. Vol. 3. № 9(111). 2021. Doi:10.15587/1729-4061.2021.235835.
  9. Куц С. М., Прогонов Д. О., Смирнов В. П. Теорія сигналів. Ч. III. Спектральний аналіз неперіодичних сигналів. Практикум. Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2019. 31 с. URL : <https://ela.kpi.ua/handle/123456789/27150>.
  10. Кобяков О. М., Бражник І. Є. Теорія електричних кіл та сигналів. Теорія сигналів. Суми: Сумський державний університет, 2017. 125 с. URL : [https://essuir.sumdu.edu.ua/bitstream/123456789/55877/1/Kobiakov\\_theoria.pdf](https://essuir.sumdu.edu.ua/bitstream/123456789/55877/1/Kobiakov_theoria.pdf).
  11. Ainslie-Malik G. R. Mathematical Analysis of PWM Process. Thesis submitted to The University of Nottingham for the degree of Doctor of Philosophy, July 2013. URL : [https://eprints.nottingham.ac.uk/handle/13021/1/Mathematical\\_Analysis\\_of\\_PWM\\_Process.pdf](https://eprints.nottingham.ac.uk/handle/13021/1/Mathematical_Analysis_of_PWM_Process.pdf).
  12. Функції Бесселя: таблиця значень. URL : [https://mat.net.ua/jk/Tab\\_of\\_listing17\\_NEW.htm](https://mat.net.ua/jk/Tab_of_listing17_NEW.htm).
  13. Heller B., Namata V. Harmonic field effects in induction machines. Prague: Academia, 1977. 330 p.
  14. Гетьман Г. К. Теорія електричної тяги: у 2-х т. Дніпропетровськ: Акцент ПП, 2015. Т. 2. 492 с.
  15. Карташов М. В. Імовірність, процеси, статистика: посібник. Київ: Видавничо-поліграфічний центр «Київський університет», 2008. 494 с. URL : [https://probability.knu.ua/userfiles/kmv/VPS\\_Pv.pdf](https://probability.knu.ua/userfiles/kmv/VPS_Pv.pdf).
  16. Бабаєв М. М., Блиндюк В. С., Давиденко М. Г. Оцінювання ступеня іскріння на колекторі тягових двигунів локомотивів. *Збірник наук. праць*. Харків: УкрДАЗТ, 2005. Вип. 68. С. 266-276.
- Ananieva O., Babaiev M., Davidenko M., Panchenko V. Frequency localization and parameter estimation of the stator winding testing signal of a three-phase asynchronous motor**
- Abstract.** Effective operation of electric railway rolling stock is possible only by maintaining a sufficiently good technical condition of traction electric motors, in particular three-phase asynchronous ones. An important component of the appropriate measures is the measurement of the electrical parameters of the stator windings by applying a test signal. The measurement accuracy is enhanced by interference currents in this winding. To increase it and more accurately determine the technical condition of the engine, it is necessary to scientifically substantiate the conditions favorable for carrying out these measurements. The work determines the frequency range of the traction current, free from interference that occurs in the stationary operating mode of a three-phase asynchronous traction motor. It is proposed to select the type and parameters of the signal so that its spectrum is located in this range. A mathematical procedure has been developed for estimating the parameters of the test signal, taking into account residual interference located in a certain frequency range. Methods of spectral analysis of interference signals were used, as well as a method for estimating parameters using the least mean squares criterion. By computer simulating an example of using a sinusoidal test signal with a known frequency, the exact characteristics of such an estimate are determined over a wide range of pulse interference amplitudes and the degree of signal overlap and interference over time.
- Keywords:** three-phase asynchronous motor, test signal, interference, spectrum, smallest average square.
- 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: tmbxiiit@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](mailto: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 train traffic, Ukrainian State University of Railway Transport, Kharkiv, Ukraine. E-mail:

[romashka13052015@gmail.com](mailto:romashka13052015@gmail.com). ID ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6686-8249>.

**Mykhailo Babaiev**, Doctor of Technical Sciences, Professor, Department of electroenergy, electrical equipment and electromechanics, Ukrainian State

University of Railway Transport, Kharkiv, Ukraine. E-mail: [mmbxiit@gmail.com](mailto:mmbxiit@gmail.com). ID ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3553-8786>.

**Mykhailo Davidenko**, PhD, Associate Professor, Department of electroenergy, electrical equipment and electromechanics, Ukrainian State University of Railway Transport, Kharkiv, Ukraine. E-mail:

[davdenk@kart.edu.ua](mailto:davdenk@kart.edu.ua). ID ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7255-3059>.

**Vladyslav Panchenko**, PhD, Associate Professor, Department of electroenergy, electrical equipment and electromechanics, Ukrainian State University of Railway Transport, Kharkiv, Ukraine. E-mail:

[vlad\\_panchenko@ukr.net](mailto:vlad_panchenko@ukr.net). ID ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4822-7151>.

БУТЬКО Т. В., д.т.н., професор, (Український державний університет залізничного транспорту)

ПАРХОМЕНКО Л. О., к.т.н., доцент, (Український державний університет залізничного транспорту)

АРТЕМОВ Е. М., аспірант, (Український державний університет залізничного транспорту)

ЛАГНО О. С., магістрант (Український державний університет залізничного транспорту)

## **Методи організації вантажних залізничних перевезень на основі ризик-орієнтованих технологій**

*Одним із основних напрямів підвищення конкурентоспроможності залізничного транспорту на ринку вантажних перевезень є забезпечення надійності функціонування залізничної транспортної системи. При цьому надійність розуміється в контексті збереження вантажу і навколишнього середовища під час перевезення, а також дотримання умов щодо визначеного строку доставки. Процес функціонування залізничної транспортної системи супроводжується ризиками виникнення різних транспортних подій, особливо в період воєнного стану. Як відомо, номенклатура вантажів, що перевозяться залізницею, є достатньо великою і включає значну кількість небезпечних вантажів, що можуть становити загрозу як для залізничної інфраструктури, так і навколишнього середовища та впливати на зменшення пропускної спроможності, невиконання строків доставки вантажів, через що в процесі операційної діяльності персоналу на залізничному транспорті доцільно спиратися на ризик-орієнтовані технології. З цієї метою авторами запропоновано понятійний апарат ризик-менеджменту, а фактори ризиків поділено на техногенні і технологічні. Така класифікація дає змогу при формалізації технологічних процесів переміщення вантажів розробляти універсальні оптимізаційні математичні моделі, які є основою систем підтримки прийняття рішень (СППР) на автоматизованих робочих місцях (АРМ) оперативного і диспетчерського персоналу.*

*Ураховуючи, що в період воєнного стану в Україні особливо актуальним постало питання перевезення зерна залізничним транспортом транзитом через території країн ЄС, у роботі сформовано оптимізаційну математичну модель з використанням апарату ризик-менеджменту, яка відображує процес просування ступінчастих «зернових» потягів з елеваторів в Україні через західні кордони до морських портів ЄС, де розташовано зернові термінали.*

*При формуванні оптимізаційної математичної моделі функціонування такого транспортно-логістичного ланцюга було прийнято, що фактор ризику є технологічним, тобто показує невиконання строків проведення сукупності технологічних операцій із вантажем (зерном) у процесі його переміщення, тоді подією буде невиконання строків доставки вагонів із зерном на термінал у порти, а наслідком – додаткові економічні витрати.*

*Ураховуючи, що об'єднуючою ланкою такого транспортно-логістичного ланцюга є зерновий потік, розмірність цільової функції оптимізаційної математичної моделі відображує грошовий еквівалент, приведений до тонни зерна.*

*Цільова функція за своєю структурою є сумою доданків у вигляді витрат на тонну зерна за кожним елементом логістичного ланцюга, а ризикова компонента – це добуток імовірності виникнення ризику і додаткових витрат. Керувачими змінними в моделі прийнято час і кількість вагонів із зерном. Система обмежень моделі відображує технічні і технологічні умови перевезення вантажів залізничним транспортом. Аналіз цільової функції доводить, що найбільш критичним елементом транспортно-логістичного ланцюга є прикордонно-передавальні станції АТ УЗ, де відбуваються митний і фітосанітарний контролю, а також перевантаження зерна у вагони колії 1435 мм габариту 02-Т, що може спричинити виставлення зернового потяга на колію суміжної країни у строк, коли надана нитка графіка на залізницях країн ЄС вже є недоступною. Саме така подія може призвести до значних додаткових витрат. Задля запобігання такій події в статті обґрунтовано можливість надання пріоритету в обслуговуванні «зернових» потягів при проходженні їх через прикордонно-передавальні станції. З цієї метою проведено статистичне дослідження всіх залізничних переходів з усіма країнами ЄС, що межують з Україною, щодо середньодобового передавання всіх вагонів і вагонів із зерном.*

На сьогодні такий пріоритет можна надати на всіх переходах, окрім переходу Чоп-Захонь (Угорщина), через який проходять виключно «зернові» потяги. Сформовану оптимізаційну математичну модель на основі ризик-орієнтованих технологій рекомендовано інтегрувати на АРМі оперативних працівників АТ УЗ та інтермодального «зернового» оператора у вигляді СППР для управління процесом просування «зернових» потягів в автоматизованому режимі.

**Ключові слова:** ризик-орієнтовані технології, вантажні залізничні перевезення, «зернові» потяги, оптимізаційна математична модель, прикордонно-передавальна станція, транспортно-логістичний ланцюг

## Вступ

Процес організації вантажних залізничних перевезень супроводжується певними ризиками техногенного і технологічного характеру. Особливо фактор ризику підвищується в період воєнного стану в Україні. Саме це спонукає в процесі операційної діяльності оперативного і диспетчерського персоналу спиратися на ризик-орієнтовані технології при переміщенні вантажів. Такі умови сьогодення потребують розвитку й адаптації апарату ризик-менеджменту до технології роботи залізничного транспорту як усередині країни, так і при кроскордонних перевезеннях вантажів. Задля зменшення впливу так званого «людського фактора» при прийнятті управлінських рішень доцільно автоматизувати цей процес шляхом інтегрування ризик-орієнтованих технологій на відповідні АРМі оперативного персоналу у вигляді СППР.

## Постановка проблеми

Підвищення надійності функціонування системи вантажних залізничних перевезень є одним із основних факторів збільшення рівня конкурентоспроможності залізничного транспорту на ринку вантажних перевезень. Саме поняття надійності системи передбачає наявність можливих збоїв у її роботі та процедур запобігання відмовам. У процесі функціонування системи вантажних залізничних перевезень виникають різного роду ризики, оскільки великі маси вантажів переміщуються з достатньо великими швидкостями або значна кількість вагонів із вантажем одночасно перебуває на сортувальних станціях (хабах), що може призвести до транспортних подій. Така природа залізничних вантажних перевезень спонукає в процесах операційної діяльності враховувати можливі ризики, тобто спиратися на ризик-орієнтовані технології.

Отже, нагальною стає проблема розвитку і адаптації технологій ризик-менеджменту при організації переміщення вантажів залізницею. Основою таких автоматизованих технологій є математичні моделі, що адекватно відтворюють технологічні процеси в системі вантажних залізничних перевезень. Ураховуючи, що в наш час актуальним завданням, яке постало перед АТ УЗ, є перевезення зерна від елеваторів через західні кордони України до морських портів країн ЄС, необхідним стає формування оптимізаційної математичної моделі при кроскордонних перевезеннях з урахуванням потенційних ризиків у процесі функціонування транспортно-логістичного ланцюга.

## Аналіз досліджень і публікацій

Ураховуючи, що функціонування транспортної галузі пов'язане з певними ризиками, багато наукових досліджень присвячено розробленню ризик-орієнтованих транспортних технологій. Так, у роботі [1] розглянуто питання функціонування сортувальної станції (СС) за наявності на ній вагонів з небезпечними вантажами (НВ). Для зменшення наслідків техногенного фактора ризику у випадку, коли один із вагонів з НВ може вибухнути, запропоновано розставляти такі вагони на колії, які знаходяться на достатній відстані від інших вагонів з НВ. Процес функціонування СС формалізовано у вигляді оптимізаційної математичної моделі, а результатом вирішення є змінно-добовий план роботи СС. У роботі [2] польських учених з метою збору інформації та подальшого її аналізу для оцінювання імовірності загрози та потенційних наслідків пропонується використання хмарної СППР (Cloud DSS). Такий підхід для оцінювання ризиків рекомендовано для залізничних транспортних компаній. Публікацію [3] присвячено формуванню автоматизованої технології надання альтернативного маршруту швидкісним пасажирським поїздам у випадку руйнування залізничної інфраструктури. З цією метою сформовано оптимізаційну математичну модель з використанням апарату ризик-менеджменту. За критерій вибору альтернативного маршруту прийнято мінімальне перевищення експлуатаційних витрат при прямуванні швидкісного пасажирського поїзда альтернативним маршрутом порівняно зі штатним графіковим перевезенням. Система обмежень відображує технічні і технологічні умови перевезення. Множина альтернативних маршрутів формується на основі зваженого графа напрямку перевезень з використанням його матриці суміжності. Модель рекомендовано інтегрувати до АСКППУЗ у вигляді СППР. У роботі [4] застосовується ризик-орієнтований підхід для формування складу потяга з небезпечними вантажами (НВ) різних класів і груп сумісності з метою зменшення можливих наслідків у результаті аварійної ситуації. Сформовано комплексний критерій, який залежить від кількості груп вагонів з НВ у складі потяга, що формується на сортувальній станції; загальної кількості вагонів з НВ; ступеня безпеки групи, до якої віднесено вагони з НВ; кількості випадків сумісного розташування вагонів різних груп безпеки. З використанням цього критерію стає можливим визначати імовірність ризику при постановці в потяг вагонів з НВ. Такий підхід дає змогу сформувати відносно безпечну комбінацію з можливих варіантів при формуванні складу потягів на сортувальній станції.

На основі проведеного аналізу можна зробити висновок про доцільність подальшого розвитку ризик-

орієнтованих транспортних технологій, особливо в частині організації міжнародних залізничних перевезень.

### Мета дослідження

Розвиток ризик-орієнтованих транспортних технологій і формування автоматизованої технології кроскордонних залізничних перевезень зерна ступінчастими маршрутами.

### Викладення основного матеріалу дослідження

Під час воєнного стану в Україні залізничний транспорт залишається основним стратегічним перевізником вантажів і пасажирів. Ця тенденція продовжує зберігатися, незважаючи на те, що за попередні десять передвоєнних років обсяг перевезених вантажів залізничним транспортом зменшився на 15 %, а за той самий період обсяг вантажних перевезень автомобільним транспортом збільшився на 20 % в основному завдяки гнучкості його графіків і маршрутів перевезень. З точки зору номенклатури вантажів залізничний транспорт має пріоритет в обсягах перевезень вугілля та коксу, руди, металів і металоконструкцій, зерна і сільгосппродукції, хімічної продукції (добрива, нафтопродукти, хімічні реагенти), будматеріалів, контейнерів тощо. Більшість вищеперахованих вантажів належить до небезпечних вантажів різних класів.

Тобто вантажні залізничні перевезення – це процес транспортування значних мас вантажів із достатньо великими швидкостями, який супроводжується значними ризиками виникнення транспортних подій, що можуть впливати як на саму залізничну інфраструктуру, так і навколишнє середовище.

Як відомо, для оцінювання функціонування залізничної транспортної системи використовується ціла низка техніко-експлуатаційних показників. Як доводить статистичний аналіз цих показників, вони мають імовірнісну природу й підпорядковуються різним законам розподілу – від експоненціального закону, законів Ерланга різного порядку до нормального закону розподілу і розподілу Вейбула. Такі дослідження доводять, що в цілому залізничну транспортну систему доцільно класифікувати як квазідетерміновану динамічну систему за шкалою Ю. Антамонова, незважаючи на цілу низку різних інструкцій з виконання технологічних операцій. Основною причиною цього є значний вплив так званого «людського» фактора в процесі прийняття рішень при управлінні функціонуванням різними елементами залізничної транспортної системи. Прийняття недостатньо раціональних рішень персоналом у процесі операційної діяльності, особливо при вантажних залізничних перевезеннях, може сприяти підвищенню ризиків настання небажаної події, наприклад невиконання строків доставки вантажів. Важливим фактором, який впливає на стабільність процесу вантажних залізничних перевезень, є руйнування залізничної інфраструктури, включно з тяговими трансформаторними підстанціями, що спричинено як техногенними

подіями, так і воєнними діями в Україні. У таких випадках природа підвищення ризику обумовлена в основному стратегічним значенням певного елемента інфраструктури залізничної транспортної системи (сортувальні, вузлові, прикордонно-передавальні станції, тягові трансформаторні підстанції тощо).

На основі вищенаведеного можна зробити висновок, що при організації вантажних залізничних перевезень необхідно впроваджувати технології управління ризиками для забезпечення і підвищення надійності і конкурентоспроможності залізничного транспорту на транспортному ринку.

Понятійний апарат ризик-менеджменту базується на такому логічному ланцюзі: фактор ризику – подія – економічні наслідки. На наш погляд, у процесі операційного управління фактори ризику доцільно поділити на техногенні і технологічні. До техногенних факторів ризику можна віднести руйнування елементів залізничної інфраструктури або внаслідок раптових відмов технічного характеру (підвищені зноси, випадкові відмови обладнання), або умисні пошкодження, наприклад внаслідок воєнних дій. Подіями в цьому випадку може бути знищення вантажів, елементів залізничної інфраструктури, рухомого складу; зменшення пропускної спроможності; невиконання строків доставки тощо. Наслідками таких подій є витрати на відновлення залізничної інфраструктури, навколишнього середовища, рухомого складу, непродуктивні простой, штрафи від невиконання строків доставки вантажу. До технологічних факторів ризику доцільно віднести невиконання (як правило, збільшення) строків проведення сукупності транспортно-логістичних технологічних операцій з вантажами в процесі їхнього переміщення, час проведення яких може підпорядковуватися різним законам розподілу. Подією в цьому випадку буде невиконання залізницею строків доставки вантажів, а економічними наслідками – непродуктивні простой рухомого складу і штрафи від невиконання строків доставки.

З метою організації вантажних залізничних перевезень на засадах ризик-орієнтованих технологій і зменшення впливу «людського» фактора в процесах прийняття рішень оперативним і диспетчерським персоналом необхідною умовою є формалізація конкретного технологічного процесу у вигляді оптимізаційної математичної моделі, що адекватно відтворює певну технологічну операцію або технологічний процес у цілому. Цільовою функцією моделі, як правило, виступає сума експлуатаційних витрат на виконання низки технологічних операцій і ризикової складової, що являє собою добуток імовірності виникнення ризику та його наслідків. Система обмежень математичної моделі відображує технічні і технологічні умови проведення технологічних операцій. Часто оптимізаційні математичні моделі використовуються в комплексі з моделлю прогнозування і програмним модулем обробки попередньої статистичної інформації, особливо це стосується технологічних факторів ризику. У цьому випадку оптимізаційні математичні

моделі належать переважно до класу моделей стохастичного програмування.

Сформовані оптимізаційні математичні моделі є основою для формування системи підтримки прийняття рішень (СППР), які інтегруються на автоматизовані робочі місця (АРМ) оперативного та диспетчерського персоналу станцій, дирекцій залізничних перевезень, регіональних центрів управління рухом поїздів тощо. Ураховуючи різноманітність технологічних операцій у процесі операційної діяльності персоналу, виникає ціла низка завдань з формалізації цих процесів як за масштабами, так і деталізацією, що базується на ризик-орієнтованих технологіях.

У наш час одним з актуальних завдань, що поставили перед вантажовідправниками та АТ УЗ, забезпечення просування «зернових», контейнерних та інших поїздів територією України до західних кордонів з країнами ЄС, перетин кордону, просування територією ЄС до портів Гданська, Гамбургу, Роттердама, Констанци тощо і далі морським транспортом до вантажоодержувачів.

При цьому просування контейнерних і «зернових» поїздів мають певні відмінності в процесі формалізації. При просуванні контейнерних поїздів значний вплив має ефект «першої милі». При просуванні «зернових» поїздів цим ефектом можна знехтувати і вважати, що вагони-зерновози завантажуються зерном з одного елеватора, або в процесі транспортування на проміжних станціях до потяга додаються групи вагонів із зерном з інших елеваторів, і формується ступінчастий маршрут відповідно до тягових розрахунків.

Зважаючи на актуальність, сформуємо оптимізаційну математичну модель управління ризиками в процесі перевезення зерна. При цьому будемо спиратися на системний підхід, тобто всі складові транспортно-логістичного ланцюга від елеваторів до зернового терміналу в портах країн ЄС об'єднаємо в єдину систему взаємопов'язаних елементів, які можуть належати різним власникам. Єдналим елементом тут є зерновий потік. Відповідно до цього як розмірність цільової функції оптимізаційної математичної моделі доцільно прийняти грошовий еквівалент, приведений до тонни вантажу (зерна). Фактор ризику будемо розглядати як технологічний.

Перевезення зерна з України за кордон може відбуватися за різними схемами: повагонними партіями, «зерновими», у тому числі ступінчастими маршрутами; перевізником територією України є АТ УЗ, перевізник по країнах ЄС визначається умовами контракту; навантаження на судно може відбуватися за прямим варіантом або через зерновий термінал.

Перевезення зерна повагонними партіями призводить до утворення так званого ефекту «останньої миті» на прикордонно-передавальній станції в Україні, сприяє утворенню значної черги з вагонів-зерновозів при проходженні митного, фітосанітарного контролів і операцій перевантаження у вагони габариту 02-Т, передбачених технологічним процесом. Крім того, повагонні відправлення можуть прямувати на адреси

різних країн усередині ЄС, що ускладнює процес перевезення і збільшує строк доставки.

Тому як найбільш перспективну обрано схему перевезення зерна ступінчастими маршрутами транзитом через країни ЄС до морських портів, де розташовано зернові термінали. Як доводить аналіз, водотоннажність судна-зерновоза коливається в межах 25-50 тис. т. Маса «зернового» потяга коливається в межах 3-3,5 тис. т. Тобто для безперервного завантаження судна необхідно накопичити на терміналі масу зерна, еквівалентну масі 8-17 «зернових» потягів.

При формуванні цільової функції математичної моделі використаємо принцип адаптивності, тобто поступового додавання питомих експлуатаційних витрат, що припадають на тонну зерна за кожним елементом транспортно-логістичного ланцюга. Управляючими змінними моделі доцільно прийняти час  $t$  і кількість вагонів  $n$  у складі «зернового» потяга. Питомі витрати на зберігання зерна у вагонах при накопиченні на технологічний маршрут

$$C_1 = \frac{C_x}{2} \cdot \frac{\sum_{i=1}^k \left( \frac{q_i}{Q_{B_i}} \right)}{\sum_{i=1}^k q_i}, \quad (1)$$

де  $q_i$  – маса зерна, що навантажується на  $i$ -му елеваторі, т;

$k$  – кількість елеваторів, що формують ступінчастий маршрут;

$Q_{B_i}$  – виробнича потужність  $i$ -го елеватора, т/год;

$C_x$  – вартість збереження 1 т зерна у вагонах за одиницю часу, грн/год.

Ураховуючи, що  $q_i = n_i \cdot q_{ст}$ , де  $q_{ст}$  – середнє статнавантаження вагона,  $n_i$  – кількість вагонів, що навантажується на  $i$ -му елеваторі,  $\sum_{i=1}^k n_i = n$ , отримуємо

$$C_1 = \frac{C_x}{2} \cdot \frac{\sum_{i=1}^k \left( \frac{n_i}{Q_{B_i}} \right)}{n}, \quad (2)$$

Питомі витрати вагоно-годин простою при навантаженні «зернового» потяга

$$C_2 = C_B \cdot \frac{\sum_{i=1}^k \left( \frac{n_i^2}{Q_{B_i}} \right)}{n}, \quad (3)$$

де  $C_B$  – грошовий еквівалент однієї години простою вагона, грн/год.

Питомі витрати на переміщення «зернового» потяга на прикордонно-передавальну станцію

$$C_3 = \frac{C_{пгуз} \cdot t_{пергуз}}{q_{ст} \cdot n}, \quad (4)$$

де  $C_{пгуз}$  – вартість поїздо-години, грн/год;

$t_{пергуз}$  – час прямування на прикордонно-передавальну станцію, год.

Питомі витрати пов'язані з простоєм вагонів із зерном на прикордонно-передавальній станції.

На основі статистичних досліджень часу виконання технологічних операцій з окремими вагонами з зерном на прикордонно-передавальних станціях було доведено, що цей час є випадковою величиною, підпорядкованою нормальному закону розподілу зі щільністю  $f(t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \cdot \exp(-\frac{(t-\bar{t})^2}{2\sigma^2})$ , де  $\bar{t}$  – математичне очікування,  $\sigma$  – середнє квадратичне відхилення. Тоді питомі витрати, пов'язані з простоем вагонів із зерном, складуться

$$C_4 = \frac{C_B}{q_{cr} \sqrt{2\pi}\sigma} \cdot \int_0^{t \leq T_{кр}} t \cdot \exp\left(-\frac{(t-\bar{t})^2}{2\sigma^2}\right) \cdot dt, \quad (5)$$

де  $T_{кр}$  – час, на який «зерновий» потяг має бути виставлений на колію шириною 1435 мм сусідньої країни ЄС, щоб встигнути потрапити на нитку графіка, надану операторською компанією.

Питомі витрати на тонну зерна, пов'язані з перевезенням «зернового» потяга територіями країн ЄС за наданою ниткою графіка до зернового терміналу у порту  $C_5[\frac{\text{грош.еквівалент}}{T}]$ .

Питомі витрати при вивантаженні зерна на терміналах  $C_6[\frac{\text{грош.еквівалент}}{T}]$ .

Цільова функція оптимізаційної математичної моделі з урахуванням ризиків має такий вигляд:

$$C(n,t) = \sum_{j=1}^6 C_j(n,t) + H \cdot (C_7 + C_8 + C_9) \Rightarrow \min, \quad (6)$$

де  $H$  – імовірність того, що виникає ризик, при якому зерновий потяг невчасно виставлений з прикордонно-передавальної станції і не встигає на надану нитку графіка по країнах ЄС;

$C_7$  – питомі витрати за нитку графіка по ЄС внаслідок її невикористання;

$C_8$  – питомі додаткові витрати вагоногодин простою внаслідок запізнення на надану нитку графіка по ЄС;

$C_9$  – питомі витрати, які виникають від недовантаження судна або внаслідок його додаткового простою.

Система обмежень математичної моделі

$$\left\{ \begin{array}{l} r_1 \leq r_{nl}, \\ t \leq T_{кр}, \\ nq_{cr} \leq F \end{array} \right. \quad (7)$$

де  $r_1$  – пропускна спроможність l-ї дільниці АТ УЗ при просуванні «зернового» ступінчастого маршруту;  
 $r_{nl}$  – наявна пропускна спроможність l-ї дільниці;  
 $F$  – максимальна вагова норма потяга на певному напрямку.

Накладена система обмежень урахує технічні і технологічні можливості залізничної інфраструктури і тягового рухомого складу.

Для того щоб транспортно-логістичний ланцюг, формалізований у вигляді формул (6) і (7) надійно функціонував, доцільно виявити найбільш критичні місця в процесі перевезень шляхом аналізу цільової функції (6).

Аналіз цільової функції (6) доводить, що ця функція має екстремум типу мінімум, при цьому цей мінімум досягається при достатньо великих значеннях аргументу  $n$ . Такий аналіз математично доводить доцільність просування великовагових «зернових» потягів через кордони з країнами ЄС транзитом у напрямку портів.

Основним критичним елементом у транспортно-логістичному «зерновому» ланцюзі при кроскордонних перевезеннях є своєчасне виставлення «зернового» потяга з прикордонно-передавальної станції АТ УЗ на колію шириною 1435 мм прикордонної станції країн ЄС у такий час, щоб забезпечити потрапляння потяга на відповідну нитку графіка, наданого операторською компанією. Саме такий підхід обумовлює надання пріоритету при проходженні «зернового» потяга територією України включно з пріоритетним виконанням технологічних операцій на прикордонно-передавальній станції АТ УЗ.

Як доводить проведений статистичний аналіз середньодобового передавання вагонів із зерном через міжнародні переходи України з країнами ЄС, а саме Польщею (Ягодин – Дорогуськ, Ізов – Грубешів, Мостиська-II – Медика), Словаччиною (Чоп – Черна над Тисою), Угорщиною (Чоп – Захонь, Батьово – Еперешке), Румунією (Вадул – Серет, Дяково – Хелмеу), кількість переданих вагонів із зерном відносно загальної кількості переданих вагонів протягом лютого-липня 2023 р. коливається по місяцях у межах від 5 до 79 %, окрім переходу Чоп – Захонь, через який йшло виключно зерно (таблиця).

Таблиця

Розподіл середньодобового передавання вагонів із зерном відносно загальної кількості переданих вагонів по міжнародних переходах і місяцях 2023 р.

Міжнародні переходи	Середньодобове передавання вагонів із зерном відносно загальної кількості переданих вагонів, %					
	Місяці 2023 р.					
	лютий	березень	квітень	травень	червень	липень
1. Польща	64,1	52,9	9,9	29,3	26,2	37,4
Ягодин-Дорогуськ	14,7	12,7	8,4	8,9	11,9	5,3

Ізов-Грубешів Мостиська-II-Медика	27,8	19,1	9,9	14,2	13,9	16,4
2. Словаччина Чоп-Черна над Тисою	20,6	13,3	10,1	10,3	15,0	20,1
3. Угорщина Чоп-Захонь Батьово-Еперешке	93,3 51,4	98,4 52,8	99,5 32,3	99,1 18,0	98,8 17,0	96,5 12,2
4. Румунія Вадул-Серет Дяково-Хелмеу	78,8 78,6	69,9 63,8	55,0 32,0	38,5 26,2	32,2 39,3	32,7 43,0

Наведені статистичні дані підтверджують можливість надання пріоритету для пропускання «зернових» поїздів через міжнародні переходи (окрім переходу Чоп-Захонь).

Задля автоматизації управління процесом просування «зернових» ступінчастих маршрутів від елеваторів в Україні через міжнародні переходи до портів країн ЄС сформовану математичну модель з використанням ризик-менеджменту доцільно інтегрувати у вигляді СППР на АРМи причетного оперативного і диспетчерського персоналу АТ УЗ та інтермодального «зернового» оператора.

#### Висновки

Відповідно до поставленої мети дослідження в роботі запропоновано напрям розвитку ризик-орієнтованих транспортних технологій при перевезенні вантажів, який базується на логічному ланцюзі фактор ризику – подія – економічні наслідки, фактори ризику поділити на техногенні і технологічні. До техногенних факторів ризику доцільно віднести можливе руйнування елементів залізничної інфраструктури, що може призвести до подій (знищення вантажів, елементів залізничної інфраструктури, рухомого складу, зменшення пропускної спроможності, невиконання строків доставки), а наслідками будуть витрати на відновлення залізничної інфраструктури, навколишнього середовища, рухомого складу, непродуктивні простой, штрафи від невиконання строків доставки вантажів. Технологічний фактор ризику є можливим невиконанням строків проведення сукупності транспортно-логістичних операцій з вантажем у процесі його переміщення, тоді подією буде невиконання строків доставки вантажу, а наслідками – непродуктивні простой рухомого складу і штрафи за невиконання строків доставки.

Спираючись на вищенаведений понятійний апарат, сформовано оптимізаційну математичну модель управління ризиками при кроскордонних перевезеннях зерна ступінчастими маршрутами від елеваторів в Україні до зернових терміналів у портах країн ЄС. Фактор ризику прийнятий як технологічний, цільова функція моделі являє собою суму приведених витрат на одну тонну зерна за всіма елементами транспортно-логістичного ланцюга та ризикової складової. Ризикова складова подана у вигляді добутка імовірності того, що «зерновий» потяг буде невчасно виставлений з прикордонно-передавальної станції АТ УЗ на колію шириною 1435 мм сусідньої

держави і не встигне на надану нитку графіка по ЄС і наслідків такої події. Система обмежень відображує технічні і технологічні можливості залізничної інфраструктури та рухомого складу. Управляючими змінними моделі є час і кількість вагонів у складі «зернового» потяга. Аналіз математичної моделі доводить, що цільова функція має екстремум типу мінімум, який досягається при достатньо великій кількості вагонів у складі потяга, що підтверджує доцільність просування великовагових «зернових» маршрутів при кроскордонних перевезеннях з України до портів ЄС. Основним критичним елементом при кроскордонних перевезеннях зерна є прикордонно-передавальні залізничні станції, де вагони проходять митний і фітосанітарний контролю і відбувається перевантаження зерна у вагони габариту 02-Т на колії шириною 1435 мм. Як довів статистичний аналіз, час перебування вагонів на цих переходах підпорядкований нормальному закону розподілу. З метою зменшення ризику непотрапляння «зернового» потяга на надану нитку графіка руху поїздів у ЄС обґрунтовано можливість надання пріоритету таким потягам різними міжнародними переходами з усіма країнами ЄС. Отже, сформовану математичну модель управління процесом перевезення «зернових» ступінчастих маршрутів при кроскордонних перевезеннях від елеваторів в Україні до морських портів країни ЄС може бути використано як СППР на АРМах оперативного і диспетчерського персоналу АТ УЗ та інтермодальних «зернових» операторів.

#### Список використаних джерел

1. Чехунов Д. М. Формування моделі оцінки ризиків на сортувальній станції при оперуванні вагонами з небезпечними вантажами із використанням математичних апаратів нечіткої логіки та Байєсових мереж. *Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті*. 2018. № 1. С. 35-41.
2. Cloud Decision Support System for Risk Management in Railway Transportation /Górka. W., Baginski I., Socha M., Steclik T., Lesniak D., Wojtas M., Flisiuk B. and Michalak M. *In Proceedings of the 14<sup>th</sup> International Conference on Software Technologies (IC SOFT – 2019)*. 2019. P. 475-482. DOI: 10.5220/007837904750482.
3. Бутько Т. В., Пархоменко Л. О., Тарасов К. О., Гайдук Д. А. Формалізація процедури надання альтернативного маршруту швидкісним пасажирським поїздам на основі ризик-менеджменту.

*Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті*. 2023. № 1. С. 31-37.

4. Lavrukhin O., Koval A., Schevchenko V., Kyman A., Kulova D. Construction of an integrated criterion for estimating the consequences of emergencies involving dangerous goods. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2019. Vol. 2, Issue 3 (98). P. 25-31. DOI: 10.15587/1729-4061. 2019. 163442.

**Butko T. V., Parkhomenko L. O., Artemov Y. M., Lahno O. S. Methods of organizing rail freight transportation based on risk-oriented technologies**

**Abstract.** One of the main ways to increase the competitiveness of railway transport in the freight transportation market is to ensure the reliability of the railway transportation system. In this case, reliability is understood in the context of: cargo and environmental safety during transportation, as well as compliance with the conditions for a certain delivery time. The process of functioning of the railway transportation system is accompanied by the risks of various transportation events, especially during martial law. As you know, the range of goods transported by rail is quite extensive and includes a significant number of dangerous goods that may pose a threat to both the railway infrastructure and the environment and may result in a decrease in throughput and failure to meet the delivery time. Based on the foregoing, it is advisable to rely on risk-oriented technologies in the process of operational activities of personnel in railway transport. To this end, the authors propose the conceptual framework of risk management, and the risk factors are divided into man-made and technological. Such a classification allows, when formalizing technological processes of cargo movement, to develop universal optimization mathematical models that are the basis of decision support systems (DSS) at automated workstations (AWS) of operational and dispatching personnel.

Given that during the period of martial law in Ukraine, the issue of grain transportation by rail in transit through the territory of the EU countries has become particularly relevant, the paper develops an optimization mathematical model using the risk management apparatus, which reflects the process of moving step grain trains from elevators in Ukraine across the western borders to the seaports of the EU where grain terminals are located.

When developing the optimization mathematical model of the functioning of such a transport and logistics chain, it was assumed that the risk factor is technological, i.e., represents the failure to meet the deadlines for a set of technological operations with cargo (grain) in the process of its movement, in which case the event will be the failure to meet the deadlines for the delivery of grain wagons to the terminal to the ports, and the consequence will be additional economic costs.

Given that the unifying link in such a transport and logistics chain is the grain flow, the dimension of the objective function of the optimization mathematical model represents the monetary equivalent reduced to a ton of grain.

The objective function is structured as a sum of terms in the form of grain transportation costs for each element of

the logistics chain, and the risk component is the product of the probability of risk and additional costs. The model's control variables are the time and number of grain wagons. The model's system of constraints reflects the technical and technological conditions of cargo transportation by rail. The analysis of the objective function shows that the most critical element of the transport and logistics chain is the border transfer stations of UZ, where customs and phytosanitary controls take place, and grain is reloaded into 1435 mm gauge wagons with a 02-T weight, which can lead to a grain train being placed on the track of a neighboring country at a time when the provided schedule thread on the EU railways is no longer available. Such an event can lead to significant additional costs. In order to prevent such an event, the article substantiates the possibility of giving priority to the maintenance of "grain" trains when they pass through border transfer stations. To this end, a statistical study was conducted of all railway crossings with all EU countries bordering Ukraine in terms of the average daily transfer of all wagons and cars with grain. At present, such a priority can be given at all crossings, except for the Chop-Zahony (Hungary) crossing, which is used exclusively by grain trains. The formed optimization mathematical model based on risk-oriented technologies is recommended to be integrated into the workstations of operational employees of JSC UZ and the workstation of an intermodal grain operator in the form of an DSS to control the process of grain train movement in an automated mode.

**Keywords:** risk-oriented technologies, freight rail transportation, grain trains, optimization mathematical model, border transfer station, transport and logistics chain.

*Бутко Тетяна Василівна, доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри управління експлуатаційною роботою, Український державний університет залізничного транспорту, Харків, Україна. E-mail: butko@kart.edu.ua. ID ORCID 0000-0003-1082-599X.*

*Пархоменко Лариса Олексіївна, кандидат технічних наук, кафедра управління експлуатаційною роботою, Український державний університет залізничного транспорту, Харків, Україна. E-mail: parhomenko@kart.edu.ua. ID ORCID 0000-0003-1647-7746.*

*Артемов Євген Миколайович, аспірант, кафедра управління експлуатаційною роботою, Український державний університет залізничного транспорту, Харків, Україна. E-mail: Artyomov20@gmail.com. ID ORCID 0009-0004-4846-5904.*

*Лагно Олександра Сергіївна, магістрант, Український державний університет залізничного транспорту, Харків, Україна. E-mail: aleksandra.lagno@gmail.com. ID ORCID 0009-0007-3920-7577.*

*Butko Tetiana Vasylivna, Dr.Sc., professor, chief of department, department of Management of operational work, Ukrainian State University of Railway Transport,*

Kharkiv, Ukraine. E-mail: [butko@kart.edu.ua](mailto:butko@kart.edu.ua).  
<https://orcid.org/0000-0003-1082-599X>.

**Parkhomenko Larysa Oleksiivna**, Ph.D., department of Management of operational work, Ukrainian State University of Railway Transport, Kharkiv, Ukraine. E-mail: [parhomenko@kart.edu.ua](mailto:parhomenko@kart.edu.ua). <https://orcid.org/0000-0003-1647-7746>.

**Artemov Yevhen Mykolayovych**, graduate student of Management of operational work, Ukrainian State

University of Railway Transport, Kharkiv, Ukraine. E-mail: [Artyomov20@gmail.com](mailto:Artyomov20@gmail.com). <https://orcid.org/0009-0004-4846-5904>.

**Lahno Oleksandra Serhiivna**, master student, Ukrainian State University of Railway Transport, Kharkiv, Ukraine. E-mail: [aleksandra.lagno@gmail.com](mailto:aleksandra.lagno@gmail.com).  
<https://orcid.org/0009-0007-3920-7577>.

ЛЯШЕНКО В. М., аспірант (Український державний університет залізничного транспорту)

ЯЦЬКО С. І., канд. техн. наук (Український державний університет залізничного транспорту)

ПЛАХТІЙ О. А., канд. техн. наук (Український державний університет залізничного транспорту)

## Досвід застосування mcda при виборі заходів з енергозбереження на рейковому електричному транспорті

*Анотація.* У статті розглядається та аналізується досвід застосування методу багатокритеріального аналізу рішень (MCDA) для вибору заходів зі зниження енерговитрат на рейковому електротранспорті з постійно-періодичним режимом тяги, такому як метрополітен, трамвай та приміські електропоїзди. Метою дослідження було визначення оптимальних заходів з енергозбереження для міських рейкових транспортних систем в Україні за допомогою групової експертної оцінки. У процесі дослідження було проведено анкетування дев'яти експертів для вибору найбільш ефективних підходів до зниження витрат електричної енергії на рух поїздів. Запропоновані заходи оцінювалися за шістьма критеріями: енергозбереження, вартість, вплив на довкілля, технологічність, надійність, безпека для пасажирів та персоналу. У статті докладно описана методологія дослідження та склад експертної групи. Дослідження спрямоване на визначення пріоритетів у впровадженні різних категорій заходів та формування стратегії зменшення енерговитрат на підприємствах рейкового електричного транспорту в Україні.

*Ключові слова:* прийняття рішень, експертне оцінювання, заходи з енергозбереження, збалансований транспорт, рейковий електричний транспорт, метрополітен, трамвай.

### Вступ.

Системи рейкового транспорту, такі як електропоїзди приміського сполучення, метро і трамваї, є важливими компонентами транспортної інфраструктури. Однак вони споживають значну кількість енергії, що призводить до збільшення експлуатаційних витрат. Тому визначення та впровадження економічно ефективних і перспективних рішень для енергозбереження в цих системах має вирішальне значення для сталого розвитку транспорту.

Наразі існують різні заходи з енергозбереження для електричного транспорту різного характеру, такі як: ефективне використання набутої енергії потягу для тяги; енергоефективні допоміжні системи та системи забезпечення комфорту пасажирів; організаційні заходи. Однак вибір найбільш перспективних та економічно ефективних заходів може бути непростим завданням, враховуючи складну та взаємозалежну природу складових транспортних систем.

Методи групової експертної оцінки, такі як аналіз режимів і наслідків відмов (*Failure Mode and Effect Analysis*, FMEA) і багатокритеріальний аналіз рішень (MCDA), все частіше використовуються в різних сферах для сприяння ефективному прийняттю рішень.

Дослідження буде зосереджене на економічній ефективності та перспективності визначених заходів з точки зору енергозбереження, з урахуванням думок експертів, різних критеріїв оцінки та різних підходів до аналізу результатів експертного оцінювання – з повним та частковим урахуванням критеріїв в залежності від можливих пріоритетів та обмежень, що можуть стояти перед транспортним підприємством.

### Аналіз останніх досліджень та публікацій.

Питання енергоефективності завжди було актуальним для залізничного транспорту через його великі обсяги споживання енергоресурсів. Багато уваги, наприклад, у роботах [1-5], було приділено проблемі витрат енергії на рейковому електричному транспорті, зокрема шляхом оптимізації траєкторії руху поїздів («стратегії керування»).

Відомі наукові дослідження, що описують досвід використання групового експертного оцінювання для вирішення транспортних проблем шляхом вибору певних заходів з певного переліку можливих варіантів. Для цього використовуються Дельфійський метод [6] або методи багатокритеріального аналізу рішень [7, 8]. Цікавим слід визнати досвід роботи [9], в якій розглядалося питання вибору обмеженої кількості найбільш ефективних заходів з багатьох можливих за допомогою багатокритеріального аналізу рішень з залученням громадськості у якості експертів та зацікавлених осіб.

В той же час, проблемі використання формалізованих методів прийняття рішень, зокрема для формування коротко- та довгострокових сталих та ефективних стратегій розвитку транспортних підприємств приділено недостатньо уваги. Велике різноманіття факторів, що впливають на енергетичну ефективність транспортних перевезень, значно ускладнюють прогнозування та прийняття рішень керівниками підприємств та їх структурних підрозділів.

#### **Визначення мети та завдання дослідження.**

Актуальність дослідження визначається необхідністю розробки та впровадження ефективних заходів для зменшення витрат електроенергії на рейковому електротранспорті в умовах зростання цін на енергоносії. Рейковий транспорт традиційно належить до енергоємних галузей, що зумовлено специфікою його функціонування та обсягом транспортної роботи, що виконується. Оптимізація енергоспоживання на підприємствах рейкового електричного транспорту є важливим завданням для забезпечення їх конкурентоспроможності та сталого розвитку. Вибір оптимальних рішень ускладнений мультифакторністю задачі та відсутністю універсальних рекомендацій.

Метою даного дослідження є визначення пріоритетності різних категорій заходів для зниження енергоспоживання на пасажирському електричному транспорті з постійно-періодичним режимом тяги, такому як метрополітен, трамвай та приміські електропоїзди.

В даній роботі будуть стисло оглянуті методи прийняття рішень за допомогою групового експертного оцінювання та загальні питання його проведення, а також буде описана процедура формування множини потенційних заходів з енергозбереження на рейковому електричному транспорті, вибору найбільш ефективних заходів за допомогою методу MCDA та аналізу отриманих результатів.

Результати дослідження нададуть інформацію про найбільш перспективні та економічно ефективні заходи з енергозбереження для систем громадського залізничного транспорту. Таким чином, вони можуть слугувати базовою стратегією-фреймворком для прийняття обґрунтованих управлінських та інвестиційних рішень щодо поетапного впровадження найбільш ефективних заходів для комплексного

зменшення питомих витрат електроенергії на пасажирські перевезення та оптимізації енергоспоживання на підприємствах рейкового електричного транспорту. Це особливо актуально в контексті інтересу до сталих та ефективних практик енергоспоживання, що сприятиме загальній сталості та життєздатності транспортного сектору України.

#### **Виклад основної частини матеріалу.**

Організації будь-яких типів стикаються з низкою ризиків та проблем, які можуть впливати на досягнення їхніх цілей [10]. Для вирішення актуальних проблем організацій, зокрема транспортних підприємств, та для підтримки сталого їх розвитку важливо правильно оцінювати виклики, що виникають у процесі діяльності та розвитку, та розробляти ефективні стратегії. Ефективність прийнятої та реалізованої стратегії, загалом, залежить від вибору найбільш результативних рішень в рамках певних обмежень [11]. Результативність рішення можна оцінити за витратами певних ресурсів – матеріальних, трудових, фінансових, часу – для досягнення поставленої мети.

#### **1. Загальні міркування щодо прийняття рішень методом експертного оцінювання**

Ефективне прийняття рішень має важливе значення для досягнення організаціями своїх цілей та збереження конкурентоспроможності у своїй галузі. Приймаючи обґрунтовані стратегічні рішення, компанії можуть мінімізувати ризики та максимізувати користь від наявних можливостей. Одним з емпіричних законів, який підкреслює необхідність аналізу та прийняття рішень, є закон Парето, що також відомий під назвою «правила 80/20». Стисло його можна виразити як «20% зусиль приносять 80% ефекту». Виходячи з цього правила, можна зробити висновок, що порівняно невелика кількість правильно обраних рішень (з великої кількості доступних) пов'язані зі значною часткою можливої вигоди для організації. Важливість виявлення таких можливостей заздалегідь цілком зрозуміла.

Розроблення та прийняття певних рішень потребує залучення до розгляду питання (проблеми) знань, досвіду та в певній мірі – інтуїції фахівців. Для підвищення надійності, зменшення суб'єктивності та для «узагальнення» наявного досвіду до ухвалення рішень залучають декількох фахівців, утворюючи таким чином групове експертне оцінювання [11]. Кожна проблема прийняття рішень має три основні компоненти: особи, які приймають рішення (експерти), альтернативи рішень (варіанти) та наслідки рішень [12].

Важливо організувати процес прийняття рішення таким чином, щоб обрана альтернатива мала наслідки, що якнайповніше відповідають меті організації (підприємства). Набір альтернатив та наслідків залежить в першу чергу від об'єктивних

умов, у яких функціонує організація; вибір їх, навпаки, залежить від експертів.

Істотну роль в якості експертного оцінювання мають два основні фактори:

- якість (компетентність) сформованої експертної групи;
- правильність підбору методики експертного оцінювання.

## 2. Формування експертної групи. Методики групового експертного оцінювання

Якісно сформована експертна група повинна відповідати таким основним вимогам, як професіональна компетентність в певній галузі, уміння вирішувати творчі завдання, наукова інтуїція, наявність знань про сучасні тренди та перспективи галузі, об'єктивність тощо. Для оцінки компетентності та відбору експертів до експертної групи використовуються різні методи, які можна об'єднати в дві великі категорії: *об'єктивні*, що базуються на об'єктивних показниках (освіта, посада, стаж роботи, індекс цитування тощо), та *суб'єктивні*, що базуються на таких методах, як голосування, самооцінка або взаємна оцінка компетентності потенційних експертів.

Після відбору експертної групи вибір однієї або декількох альтернатив для досягнення поставленої мети проводиться за допомогою методів групового експертного оцінювання. До найбільш розповсюджених методів належать [11, 13]:

- разові опитування, які можуть бути як індивідуальними (анкетування, інтерв'ю), так і колективними (дискусія, мозковий штурм);
- опитування зі зваженими оцінками (метод Дельфі), яке передбачає кілька раундів анкетування, зворотного зв'язку та обговорення з метою досягнення консенсусу або зближення думок експертів;
- метод дерева рішень, що використовує візуальне представлення можливих шляхів прийняття рішень, які застосовуються для оцінки потенційних наслідків того чи іншого рішення;
- метод FMEA (*Failure Modes and Effects Analysis*), за якого команда експертів систематично аналізує та оцінює кожен компонент або крок у процесі для виявлення потенційних режимів відмов, їх наслідків і причин цих режимів відмов;
- MCDA (*Multiple Criteria Decision Analysis*), який передбачає створення матриці рішень, де кожна альтернатива оцінюється за кожним критерієм, присвоєння ваг критеріям для відображення їхньої відносної важливості та обчислення загального балу для кожної альтернативи.

## 3. Відбір можливих заходів щодо енергозбереження на рейковому транспорті

Питання енергозбереження на рейковому транспорті є питанням вибору однієї або декількох альтернатив з багатьох можливих. Відбір при цьому повинен відбуватися за певними критеріями, що є пріоритетними для транспортної організації, у рамках певної невизначеності. Ця невизначеність створюється не лише унікальністю специфіки кожного транспортного підприємства, так і відсутністю точної картини майбутнього – неможливістю достеменно передбачити зміни техніки та технології залізничного транспорту. Одним з найбільш розповсюджених методів для вирішення подібних проблем є метод багатокритеріального аналізу (MCDA). Це пов'язано з тим, що він дозволяє враховувати різні критерії та вимоги, такі як енергетична ефективність, вартість впровадження, рівень безпеки тощо. MCDA дозволяє поєднувати як об'єктивні числові показники, так і бальні оцінки для суб'єктивних показників. За допомогою MCDA особи, які приймають рішення, можуть систематично оцінювати різні варіанти та їх ефективність за цими критеріями, допомагаючи визначити найбільш ефективні рішення для скорочення енергоспоживання в системах рейкового електричного транспорту.

На сьогоднішній день основним підходом до енергозбереження залізниць є енергоефективна конструкція локомотивів та моторних одиниць, ефективне зменшення опору руху поїздів, а також належне утримання рухомого складу та колії. Водночас, зростання цін на енергоносії та екологічні проблеми роблять бажаними інші підходи до енергозбереження, такі як енергоефективне управління поїздами для залізниць і операторів рухомого складу, а в найближчому майбутньому - автоматизовані системи управління систем керування потягами [14]. Обране рішення повинне експлуатуватися деякий час, що загалом вимірюється роками. Цей фактор потребує приділяти істотну увагу сучасним трендам та перспективним технологіям найближчого майбутнього, ефективність та доцільність яких важко оцінити класичними методами прогнозування, такими як якісні моделі або числова екстраполяція. Обране рішення повинне не лише

відповідати умовам сучасності, але й майбутнього (*future-proof*).

Загалом, заходи з енергозбереження можна об'єднати у дві категорії – технічні та організаційні. Враховуючи специфіку транспортних систем, а саме особливості структури енерговитрат рухомого складу, технічні рішення були додатково розбиті на дві підгрупи. Таким чином, запропоновані експертам заходи для досягнення поставленої цілі були об'єднані у три групи: по-перше, заходи, що стосуються більш ефективного використання набутої потягом енергії при русі (8); по-друге, заходи, що стосуються покращення допоміжних систем електрорухомого складу, систем забезпечення комфорту пасажирів та не мають прямого відношення до руху потяга (6); по-третє, заходи організаційного характеру, що не пов'язані з конструктивними змінами у рухомому складі (3). Оцінювання експертами проводилось за шістьма критеріями:

- зменшення витрат енергії;
- вартість впровадження;
- вплив на оточуюче середовище;
- технологічність рішення;
- надійність у роботі;
- безпека для пасажирів та персоналу.

#### 4. Використання системи багатокритеріального аналізу рішень та проведення групового експертного опитування

Для відбору найбільш ефективних рішень використовувалася система багатокритеріального аналізу рішень з використанням зваженого добутку (*Weighted Product Model, WPM*). У порівнянні з методом зваженої суми (*Weighted Sum Model, WSM*) метод зваженого добутку не має деяких притаманних недоліків, які знижують гнучкість оцінювання [15].

Результат аналізу обчислюється за допомогою виразу [1]:

$$P(A_K) = \prod_{j=1}^n (a_{Kj})^{w_j} \quad (1)$$

де  $P(A_K)$  – результат оцінювання варіанту  $A_K$ ;

$a_{Kj}$  – експертна оцінка кожного варіанту за кожним критерієм;  
 $w_j$  – вага  $j$ -го критерію.

Для проведення групового експертного оцінювання за допомогою методу рекомендації була сформована експертна група з 9 фахівців. Умовно експертів було поділено на дві категорії: «практики», тобто ті, які мають безпосередній досвід у роботі на транспортних підприємствах та «теоретики», куди були включені люди, що займаються академічними дослідженнями транспортних систем. Група «практиків» складалася з трьох машиністів-інструкторів (АТ «Укрзалізниця» та КП «Харківський метрополітен»); група «теоретиків» - з представників Українського державного університету залізничного транспорту та Харківського політехнічного інституту. Для формування експертної групи був використаний гібридний метод, що поєднував у собі документальний та рекомендаційний підходи.

Багатокритеріальний аналіз рішень методом зваженого добутку проводився за допомогою анкети, у якій експертам пропонувалося виставити ваги для критеріїв у довільній шкалі, після чого оцінити кожне з потенційних рішень з енергозбереження за десятибальною шкалою (від 1 до 10). Оцінка кожного рішення для кожного експерта проводилася шляхом обчислення виразу [1].

Результати експертного оцінювання методом багатокритеріального аналізу наведені на рисунках 1 та 2.



Рис. 1 Загальний результат експертного оцінювання. Заходи, що стосуються більш ефективного використання набутої потягом енергії виділені синім кольором; заходи, що стосуються покращення допоміжних систем електрорухомого складу та систем забезпечення комфорту пасажирів – зеленим; заходи організаційного характеру – жовтим.



Рис. 2 Результати експертного оцінювання різними групами: групою «практиків» (помаранчевий колір) та «теоретиків» (синій)

## 5. Аналіз результатів групового експертного опитування

Результати групового експертного оцінювання показують, що за сукупністю критеріїв найбільш ефективними заходами щодо енергозбереження на транспортних підприємствах за є три заходи, що формують дещо відокремлену групу. Сюди ввійшли такі заходи, як забезпечення оптимальних режимів руху поїздів (результуючий бал  $R=6,96$ ), використання енергозберігаючого освітлення ( $R=6,72$ ) та використання рекуперативного гальмування в мережу ( $R=6,71$ ). Між позиціями №3 та №4 спостерігається помітний розрив у величині експертних оцінок. Важливо відмітити те, що експертна група дала досить низьку оцінку у контексті енергозбереження на рухомому складі з постійно-періодичним режимом тяги таким заходом, як рекуперация на накопичувачі (як бортовий, так і стаціонарний) та особливо автоведенню поїздів. Середній результуючий бал  $R$  розподіляється по групах заходів наступним чином: заходи організаційного характеру – 6,48; заходи, що стосуються покращення допоміжних систем електрорухомого складу та систем забезпечення комфорту пасажирів – 6,15; заходи, що стосуються більш ефективного використання набутої потягом енергії – 5,80.

Для поглиблення аналізу одночасно з усередненою оцінкою у кожній з двох груп експертів вираховувалося середньоквадратичне відхилення  $\sigma$  оцінки кожного з 17 запропонованих рішень. Метою введення цього кількісного показника є встановлення міри «згоди» експертів між собою щодо кожного з заходів. Невисоке значення відхилення свідчить про впевненість експертів щодо виставленої оцінки

певному заходу. Такими заходами, наприклад, є «Зниження основного опору рухові поїздів» ( $\sigma = 0,84$ ) та «Впровадження рекуперативного гальмування на стаціонарний накопичувач» ( $\sigma = 1,08$ ). Навпаки, деякі з запропонованих заходів не змогли знайти згоди до експертів щодо їх оцінки. Найбільша розбіжність думок була виявлена щодо «Впровадження автоведення поїздів» ( $\sigma = 1,9$ ) та «Використання енергоефективних тягових приводів» ( $\sigma = 1,73$ ). Дещо більша у середньому  $\sigma$  спостерігається серед групи «практиків». Якщо експертна оцінка заходу інтерпретується як його загальна ефективність та доречність, то середньоквадратичне відхилення можна інтерпретувати як міру ризику та невизначеності при його впровадженні, тобто як міру невпевненості в точності оцінки. Спираючись на це, усі перелічені заходи можна розбити на чотири групи:

- *пріоритетні* (більш ефективні з малим рівнем невизначеності);
- *доцільні* (більш ефективні з великим рівнем невизначеності);
- *можливі* (менш ефективні з малим рівнем невизначеності);
- *специфічні* (менш ефективні з великим рівнем ризику).

Для визначення приналежності кожного конкретного заходу до однієї з вищезазначених категорій було виконано порівняння його балу ефективності та міри невизначеності з відповідними медіанами обох показників. Заходи з очікуваною ефективністю вище медіанної вважаються «більш ефективними» та навпаки; аналогічним чином була ранжована міра невизначеності. Результати такої категоризації наведені на Рисунку 3.

<p><b>Пріоритетні (<math>R &gt; 6,12, \sigma &lt; 1,47</math>)</b> Більш ефективні та з малим ризиком</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Впровадження рекуперативного гальмування (в мережу);</li> <li>- Використання енергоефективних систем підзаряду батарей;</li> <li>- Покращення теплоізоляції салонів вагону;</li> <li>- Використання енергоефективної вентиляції салонів;</li> <li>- Зниження основного опору рухові поїздів.</li> </ul>	<p><b>Доцільні (<math>R &gt; 6,12, \sigma &lt; 1,47</math>)</b> Менш ефективні з малим ризиком</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Зменшення простоїв потягів на зупинках;</li> <li>- Використання енергоефективних систем клімат-контролю;</li> <li>- Використання полегшених матеріалів (зниження маси тари);</li> <li>- Впровадження рекуперативного гальмування (на стаціонарній накопичувачі).</li> </ul>
<p><b>Можливі (<math>R &gt; 6,12, \sigma &gt; 1,47</math>)</b> Більш ефективні з великим ризиком</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Забезпечення оптимальних режимів ведення поїздів;</li> <li>- Використання енергозберігаючого освітлення;</li> <li>- Забезпечення оптимального наповнення поїздів.</li> </ul>	<p><b>Специфічні (<math>R &lt; 6,12, \sigma &gt; 1,47</math>)</b> Менш ефективні з великим ризиком</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Використання енергоефективних тягових приводів;</li> <li>- Впровадження рекуперативного гальмування (на бортовій накопичувачі);</li> <li>- Утилізація тепла електрообладнання для обігріву салону;</li> <li>- Впровадження прищільного гальмування;</li> <li>- Впровадження автоведення поїздів.</li> </ul>

Рисунок 3. Категоризація заходів за їх очікуваною ефективністю та мірою невизначеності

Окремо було розглянуте актуальне питання співвідношення між капітальними витратами та очікуваним економічним ефектом (кількістю збереженої енергії). Доречним методом для визначення тісноти зв'язку між двома рядами числових значень є розрахунок коефіцієнту кореляції між ними. Для бальних оцінок капітальних витрат та енергозбереження коефіцієнт кореляції Пірсона  $\rho$  складає 0.446, що вказує на порівняно невисокий рівень зв'язку між величинами. Емпірична формула, що зв'язує обидві бальних оцінки, розрахована методом найменших квадратів, має наступний вигляд [2]:

$$S = 3,19 + 0,416 \times C \quad (2)$$

де  $S$  – очікувана бальна оцінка кількості збереженої енергії;  
 $C$  – бальна оцінка величини капітальних вкладень;

Формула [2] має невисокий коефіцієнт детермінації  $R^2=0.2$ . Враховуючи, що величина  $C$  приймає значення від 0 до 10, найбільший результат формули [2] складає 7.35; майже половина цієї величини припадає на постійний коефіцієнт, незалежний від рівня капітальних витрат. Усе вищезазначене вказує на те, що виведення певної загальної залежності очікуваної експертами енергетичної ефективності заходу від капітальних вкладень є недоцільним, а економічна ефективність кожного заходу має оцінюватися окремо. Для цього був використаний умовний показник економічної ефективності  $E$  [3]:

$$E = \frac{S}{10-C} \quad (3)$$

Результати розрахунку умовної економічної ефективності для кожного заходу наведені на діаграмі на рисунку 4.



Рисунок 4. Заходи, відсортовані за відношенням бальної оцінки енергозбереження до бальної оцінки вартості їх впровадження

Зворотну до  $E$  величину можна вважати умовним терміном окупності кожного окремого заходу. Більше значення оцінки  $E$  означає менший

термін окупності, і навпаки. Загальна залежність умовної оцінки строку окупності від умовної оцінки величини капітальних витрат наведена на рисунку 5.

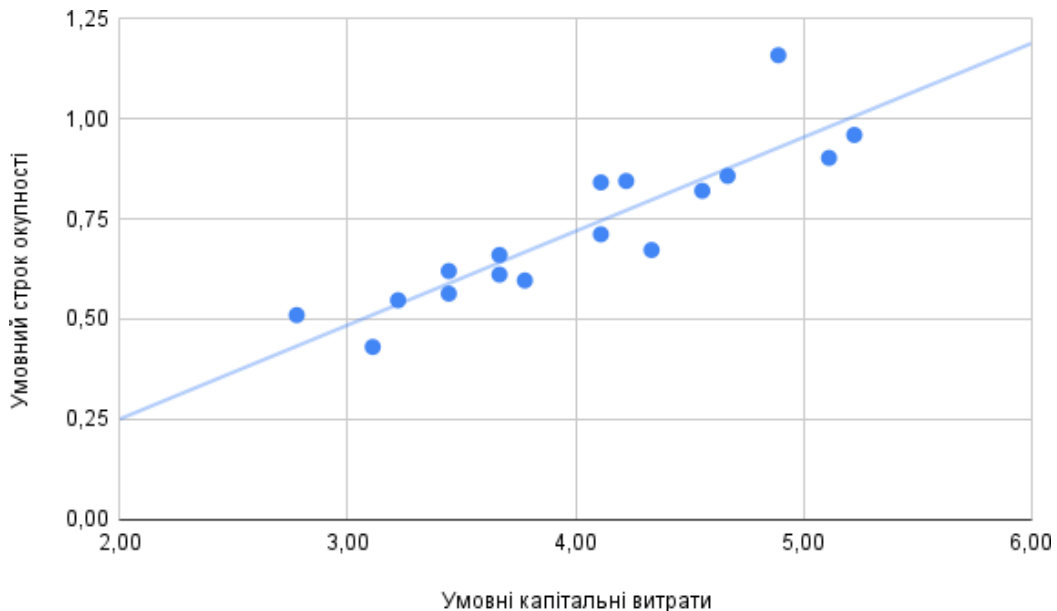


Рисунок 5. Залежність умовної оцінки строку окупності від умовної оцінки капітальних витрат

З наведених на рисунку 4 та 5 графіків можна бачити, що загалом експерти схильні вважати заходи з великими капітальними витратами як такі, що мають порівняно більший термін окупності. Також цікавим висновком з емпіричної залежності [2] є те, що менш вартісні заходи (більше значення оцінки  $C$ ) експерти вважають такими, що забезпечують порівняно вищий рівень енергозбереження (оцінки  $S$ ). У сукупності це може свідчити про наявність певних парадигм у мисленні експертів («набутого розуміння»), вироблених досвідом та практикою. «Набуте розуміння» може не зовсім точно відповідати сучасним тенденціям у розвитку технологій залізничного транспорту та перешкоджати об'єктивному оцінюванню та відбору перспективних

заходів – наприклад, переоцінювати ефективність певної групи. Тема «набутого розуміння» як фактору, що може призводити до неоптимальних рішень при експертному оцінюванні, виходить за межі даного дослідження та потребує окремої уваги.

#### Висновки.

У даному дослідженні за допомогою методу багатокритеріального аналізу рішень (MCDA) та анкетування групи експертів було визначено пріоритетність різних категорій заходів для зниження енергоспоживання на пасажирському електричному транспорті з постійно-періодичним режимом тяги, характерним для метрополітенів, приміського моторвагонного рухомого складу та інших.

Результати дослідження свідчать, що оптимальними заходами за сукупністю критеріїв, таких як: очікуваний рівень енергозбереження, вартість впровадження, технологічність, надійність та безпека як для оточуючого середовища, так і для пасажирів, на думку експертів, є забезпечення оптимальних режимів руху поїздів (тобто такої комбінації фаз прискорення, вибігу та уповільнення, що мінімізує витрати енергії), використання енергозберігаючого освітлення та використання рекуперативного гальмування в мережу. Слід відзначити, що дослідження показало неготовність експертів до довготривалих вкладень – результати аналізу свідчать, що експерти схильні вважати заходи з невисокими фінансовими витратами більш ефективними.

Спираючись на висновки експертів, можна стверджувати, що послідовна та комплексна стратегія зменшення витрат електрорухомим складом має складатися як з організаційних, так і технічних заходів, причому за умови обмежених фінансових можливостей організаційні заходи мають передувати технічним, а модернізація систем, що не пов'язані з витратами безпосередньо на тягу – модернізації власне тягових приводів та рухомого складу.

В той же час, остаточне рішення щодо вибору заходів та порядку їх впровадження лежить на уповноваженій особі – керівникові транспортного підприємства або структурного підрозділу. Дане дослідження може слугувати основою (фреймворком) для послідовної та ефективної стратегії зменшення витрат енергії на транспортних системах з постійно-періодичним режимом руху електрорухомого складу. Проведений багатокритеріальний аналіз свідчить, що помітного зменшення витрат енергії можна досягти без істотних капіталовкладень та значних змін в конструкції рухомого складу, що є особливо привабливим для транспортних підприємств.

#### Список використаних джерел

1. Донченко А. В., Сулим А. О., Сіора О. С., Мельник О. О., Федоров В. В. Аналіз питань енергозбереження та енергоефективності під час експлуатації рухомого складу метрополітену. *Наука та прогрес транспорту. Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна*. 2016. №3. С. 108-119. DOI: 10.15802/stp2016/74732.
2. Qing Gu, Tao Tang, Yong-duan Song. A Survey on Energy-saving Operations of Railway Transportation Systems. *Measurement + Control*. 2010. №43 (7). P. 209-211. DOI: 10.1177/002029401004300704.
3. S. Yatsko, B. Sytnik, Y. Vaschenko, A. Sidorenko, B. Lyubarskyi, I. Veretennikov, M. Glebova. Comprehensive approach to modeling dynamic processes in the system of underground rail electric traction. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2019. №1(9 (97)). P. 48-57. DOI: 10.15587/1729-4061.2019.154520.
4. S. Yatsko, A. Sidorenko, Ya. Vaschenko, B. Lyubarskyi, B. Yeritsyan. Method to Improve the Efficiency of the Traction Rolling Stock with Onboard Energy Storage. *International Journal of Renewable Energy Research*. 2019. №2 (9). P. 848-858.
5. Serhiy Yatsko, Yaroslav Vaschenko, Anatoliy Sydorenko. Development of strategies for reducing traction energy consumption by electric rolling stock. *Computational Problems of Electrical Engineering*. 2019. №1 (9). P. 44-52. DOI: 10.23939/jcpee2019.01.044.
6. Alberto Romero-Ania, Lourdes Rivero Gutiérrez, María Auxiliadora De Vicente Oliva. Multiple Criteria Decision Analysis of Sustainable Urban Public Transport Systems. *Mathematics*. 2021. №9 (16), 1844. DOI: 10.3390/math9161844.
7. Rashmi Munjal, William Liu, Xuejun Li, Jairo Gutierrez, Peter Han Joo Chong. Multi-Attribute Decision Making for Energy-Efficient Public Transport Network Selection in Smart Cities. *Future Internet*. 2022. №14 (2), 42. DOI: 10.3390/fi14020042.
8. Anna Dolinayova, Vladislav Zitricky, Lenka Cerna. Decision-Making Process in the Case of Insufficient Rail Capacity. *Sustainability*. 2020. №12 (12), 5023. DOI: 10.3390/su12125023.
9. Dimitrios Nalmpantis, Anastasia Roukouni, Evangelos Genitsaris, Afroditi Stamelou, Aristotelis Naniopoulos. Evaluation of innovative ideas for Public Transport proposed by citizens using Multi-Criteria Decision Analysis (MCDA). *European Transport Research Review*. 2019. №11 (22). DOI: 10.1186/s12544-019-0356-6.
10. ДСТУ ІЕС/ISO 31010:2013. Керування ризиком. Методи загального оцінювання ризику. (ІЕС/ISO 31010:2009, IDT). [Чинний від 2014-07-01]. Вид. офіц. Київ: Мінекономрозвитку України, 2015. 74 с.
11. Величко О. М., Коломієць Л. В., Гордієнко Т. Б., Шевцов А. Г., Карпенко С. Р., Габер А. А. Групове експертне оцінювання та компетентність експертів. / за заг. ред. О. М. Величка. Одеса: ФОП Бондаренко М. О., 2015. 286 с.
12. Mahdi Zarghami, Ferenc Szidarovszky. Multicriteria Analysis. Application to Water and Environment Management. - Springer Berlin, Heidelberg, 2011. 159 p.
13. Stephen N. Luko. Risk Assessment Techniques. *Quality Engineering*. 2014. №26 (3). P. 379-382. DOI: 10.1080/08982112.2014.875769.
14. Rongfang Rachel Liu, Iakov Golovitcher. Energy-efficient operation of rail vehicles. *Transportation Research Part A Policy and Practice*. 2003. №37 (10). P. 917-932. DOI: 10.1016/j.tra.2003.07.001.
15. Chris Tofallis. Add or Multiply? A Tutorial on Ranking and Choosing with Multiple Criteria. *INFORMS Transactions on Education*. 2014. №14 (3). P. 103-119. DOI: 10.1287/ited.2013.0124.

#### EXPERIENCE OF APPLYING MCDA FOR ENERGY SAVING MEASURES IN RAIL ELECTRIC TRANSPORT

Postgraduate V. M. Liashenko, PhD (Tech.) S. I. Yatsko,  
PhD (Tech.) O. A. Plakhtii

Харків, Україна. E-mail:  
[a.plakhtiy1989@gmail.com](mailto:a.plakhtiy1989@gmail.com) ORCID ID:  
<https://orcid.org/0000-0002-1535-8991>

**Abstract.** The article discusses and analyses the experience of applying the multicriteria decision analysis (MCDA) method for the selection of measures to reduce energy consumption in rail electric transport with a periodic traction mode, such as the subway, tram and suburban electric trains. The aim of the study was to identify the optimal energy saving measures for urban rail transport systems in Ukraine using a group expert assessment.

In the course of the study, nine experts were surveyed to select the most effective and sustainable approaches to reducing electricity consumption for train operations. The proposed measures were evaluated according to six criteria: energy saving, cost, environmental impact, maintainability, reliability, and safety for passengers and staff. The Weighted Product Method was used to evaluate and rank the 17 potential energy saving measures proposed by the experts. The proposed energy saving measures were divided into organisational and technical, with the latter also further divided into those related to traction energy consumption and secondary measures related to comfort and life support systems.

In order to deepen the analysis, not only the data from the multicriteria evaluation itself was used, but also the agreement of experts on each specific potential solution was evaluated to identify potential high-risk options by measuring the standard deviation of the scores. A partial analysis was also conducted based on a limited number of criteria, primarily aimed at identifying the most cost-effective measures with fast recoup periods.

The study aims to prioritise the implementation of different categories of measures and develop a strategy for reducing energy consumption at rail electric transport enterprises in Ukraine, especially in the context of uncertainty and limited resources of enterprises.

**Keywords:** decision-making, expert evaluation, energy saving measures, sustainable transport, electric rail transport, metro, tram.

**Ляшенко Вадим Михайлович**, аспірант кафедри електроенергетики, електротехніки та електромеханіки, Український державний університет залізничного транспорту, Харків, Україна. E-mail: [lyashenkovm99@gmail.com](mailto: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](mailto:ua.yatsko@gmail.com). ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-5977-8613>

**Плахтій Олександр Андрійович**, кандидат технічних наук, доцент кафедри електроенергетики, електротехніки та електромеханіки, Український державний університет залізничного транспорту,

**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](mailto: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](mailto:ua.yatsko@gmail.com). ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-5977-8613>

**Plakhtii Oleksandr**, PhD, Associate Professor of Department of Electrical Power Engineering, Electrical Engineering and Electromechanics, Ukrainian State University of Railway Transport, Kharkiv, Ukraine. E-mail: [a.plakhtiy1989@gmail.com](mailto:a.plakhtiy1989@gmail.com). ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-1535-8991>

УДК 629.4

DOI: 10.18664/ikszt.v28i4.296387

КИРИЧЕНКО О. М., канд. техн. Наук (Український державний університет залізничного транспорту)

РАКІВНЕНКО В. П., канд. техн. Наук (Український державний університет залізничного транспорту)

КОЛІСНИК А. В., канд. техн. наук (Український державний університет залізничного транспорту)

## Графоаналітичний підхід до визначення працездатності ходової частини важких транспортних агрегатів через систему колесо-рейка

*У статті досліджено напружений стан контакту в системі колесо-рейка за методом кінцевих елементів при використанні пружної напівплощини з урахуванням нормальних дотичних зусиль і їхньої сумісної дії. За допомогою комп'ютерної програми MAPLE-18 побудовано тримірні епюри поля напруження зони контакту для чисельних варіантів навантажень.*

**Ключові слова:** метод кінцевих елементів, програма MAPLE-18, система колесо-рейка, залізничний транспорт, поле контактних напружень, епюри напружень.

### Вступ

З появою залізничного транспорту на початку XIX століття виникла проблема забезпечення високого рівня безпеки експлуатації потягів, у першу чергу пасажирських – вони були першими на залізниці. Небувала до того часу швидкість цього виду транспорту викликала у фахівців тривогу щодо критичних елементів потяга. Одним із таких елементів виявилася ходова частина, яка в купі зі станом дорожнього полотна і рейок визначає безпеку руху потягів.

Розглядаючи ходову частину, наприклад, сучасної бронетехніки, в умовах війни можна зробити висновки, що вона є найбільш слабкою ланкою, що значно впливає на хід бойових дій за її участю. Стан ходової частини нерідко є запорукою боєздатності бойової машини.

Тому несуча здатність ходової частини стала метою наукових досліджень напружено-деформованого стану в зоні контакту коліс з рейкою для потяга; для гусеничних машин «поняття колесо-рейка» ототожнюється з системою «коток-трак», де трак – це ланка гусеничної стрічки.

### Аналіз останніх досліджень і публікацій

У роботах Сен-Венана і Герца [1] та інших науковців контактна задача розглядалася як плоска одновісна з розв'язком в напівемпіричній формі.

Згодом з урахуванням вимог безпеки експлуатації залізничного транспорту велику увагу вчені багатьох країн стали приділяти дослідженню силового контакту колеса з рейкою.

Слід відзначити вагомий внесок вітчизняних вчених у розв'язанні контактних задач [2, 3], які заклали основи вирішення проблем, що розглядаються.

У роботах [4, 5, 6] досліджуються питання, пов'язані з впливом на несучу здатність ходової частини потягів, пластичних деформацій і можливої появи тріщин.

Важливою є робота [7], у якій поле напружень визначається не тільки в зоні контакту, а також углибині матеріалу контактуючих елементів, тобто пружній напівплощині.

Заслужують на увагу роботи [8, 9], де досліджуються поля напружень пари колесо-рейка на різних етапах експлуатації потяга (простій, початок і кінець руху, сталий рух). До них можна віднести роботи [10, 11], де подані результати замірів поля напружень системи колесо-рейка на вказаних етапах експлуатації натурних зразків рухомого складу залізниці.

У більшості з наведених робіт контактні задачі розглядаються в лінійній постановці – розв'язання громіздкі і займають багато часу, що не припустимо в епоху сучасних ЕОМ.

**Визначення мети та завдання дослідження**

Метою роботи є отримання більш достовірної картини напруженого стану зони контакту системи аналізом несучої здатності системи для різних випадків навантаження.

**Основна частина досліджень**

У роботах різних авторів доведено, що в колесі і рейці, виконаних з одного матеріалу, максимальні контактні напруження за величиною виявляються однаковими і носять яскраво виражений локальний характер.

колесо-рейка шляхом побудови математичної моделі задачі з графічним відображенням її у вигляді епюр напружень і подальшим

Ця обставина дає можливість записати аналітичні залежності для контактних напружень, використовуючи модель пружних напівплощин, при дії різних поверхневих навантажень. Такий підхід суттєво спрощує визначення і аналіз поля напружень у контактній зоні. При цьому використовується як декартова, так і полярна системи координат (рис. 1).

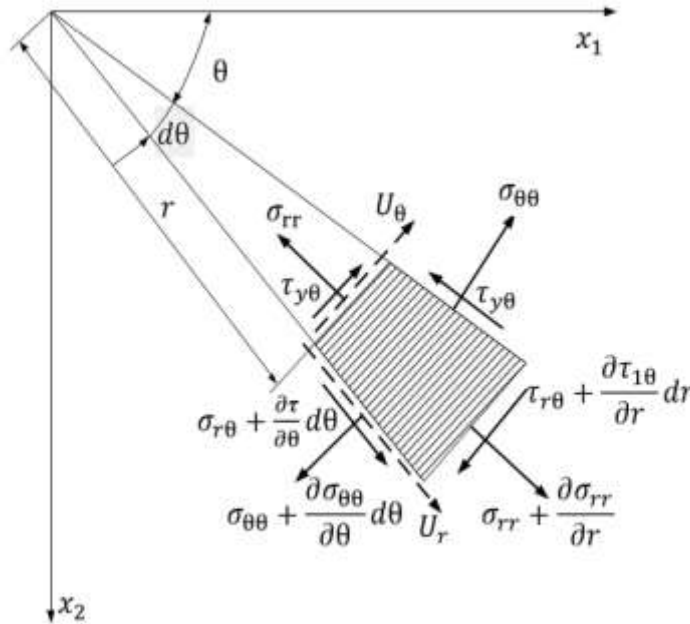


Рис. 1. Основні позначення напружень і переміщень

Для дослідження напружено-деформованого стану системи колесо-рейка використовуються рівняння тримірної теорії пружності з трьома компонентами напружень:

$\sigma_{11}, \sigma_{22}, \sigma_{12}$  – для рейки,  $\sigma_r, \sigma_\theta, \sigma_{r\theta}$  – для колеса.

Відповідно математична модель задачі будується так: використовуючи функцію напружень Ейрі

$\Phi(x_1, x_2)$  для

виразів  $\sigma_{11} = \frac{\partial^2 \Phi}{\partial x_2^2}, \sigma_{22} = \frac{\partial^2 \Phi}{\partial x_1^2}, \sigma_{12} = -\frac{\partial^2 \Phi}{\partial x_1 \partial x_2}$  у

декартовій системі координат отримуємо базове рівняння сумісності деформації (бігармонічне рівняння)

$$\frac{\partial^4 \Phi}{\partial x_1^4} + 2 \frac{\partial^4 \Phi}{\partial x_1^2 \partial x_2^2} + \frac{\partial^4 \Phi}{\partial x_2^4} = 0; \quad (1)$$

- за вищенаведеним алгоритмом, але в полярній системі координат, через функцію Ейрі відображаємо контактні напруження

$$\sigma_{rr} = \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial \Phi}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \cdot \frac{\partial^2 \Phi}{\partial \theta^2}, \sigma_{\theta\theta} = \frac{\partial^2 \Phi}{\partial r^2} \quad \text{і}$$

$$\sigma_{r\theta} = \frac{1}{r^2} \cdot \frac{\partial \Phi}{\partial \theta} - \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial^2 \Phi}{\partial r \partial \theta^2}, \quad \text{тоді рівняння}$$

сумісності деформацій, як основне, матиме вигляд

$$\left( \frac{\partial^2}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2}{\partial \theta^2} \right) \left( \frac{\partial^2}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial \Phi}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 \Phi}{\partial \theta^2} \right) = 0 \quad (2)$$

Надалі розглядаються окремі випадки навантаження. Розглянемо дію зосередженої сили, що є нормальною до межі напівплощини. Для визначення напружень у напівплощині (колесі) від дії зосередженої сили  $P$  на першому

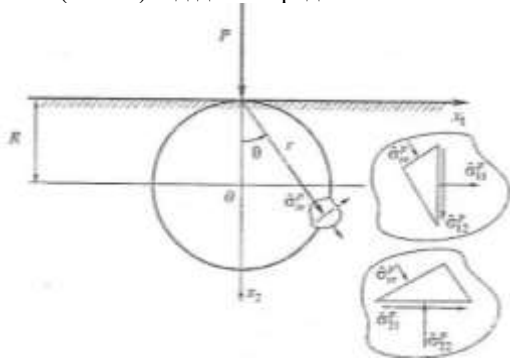


Рис. 2. Схеми визначення напружень

$$\sigma_{11}^p, \sigma_{22}^p, \sigma_{12}^p = -\sigma_{21}^p$$

Для розв'язання задачі через потенціальну функцію  $\Phi^p(r, \theta) = \frac{P}{\pi} \cdot r \cdot \theta \cdot \sin \theta$  запишемо

вираз  $\sigma_{rr}^p$

$$\sigma_{rr}^p = \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial \Phi^p}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \cdot \frac{\partial^2 \Phi^p}{\partial \theta^2} = -\frac{2P \cos \theta}{\pi r} \quad (3)$$

Використовуючи умови рівноваги елементарних тетраєдрів (рис. 2) знаходимо

$$\sigma_{11}^p = \sigma_{rr}^p \cdot \sin^2 \theta, \quad \sigma_{22}^p = \sigma_{rr}^p \cdot \cos^2 \theta, \\ \sigma_{12}^p = \sigma_{rr}^p \cdot \sin \theta \cdot \cos \theta. \text{ Ураховуючи вираз (3) і}$$

те, що  $\sin \theta = \frac{x_1}{r}$ ,  $\cos \theta = \frac{x_2}{r}$ ,  $r^2 = x_1^2 + x_2^2$ ,

переходимо до виразів компонентів напружень у декартовій системі координат:

етапі скористаємося полярною системою координат (рис. 2).

$$\sigma_{11}^p = \frac{2p}{\pi} \cdot \frac{x_1^2 \cdot x_2^2}{r^4}, \quad \sigma_{22}^p = \frac{2p}{\pi} \cdot \frac{x_2^3}{r^4}, \\ \sigma_{12}^p = \frac{2p}{\pi} \cdot \frac{x_1 \cdot x_2^2}{r^4} \quad (4)$$

Надалі зовнішнє зосередження навантаження  $P$  змінимо на розподілене  $q$  у вигляді [12]

$$q(x_1) = q_0 \cdot \sqrt{1 - \left( \frac{x_1}{a} \right)^2} \quad (5)$$

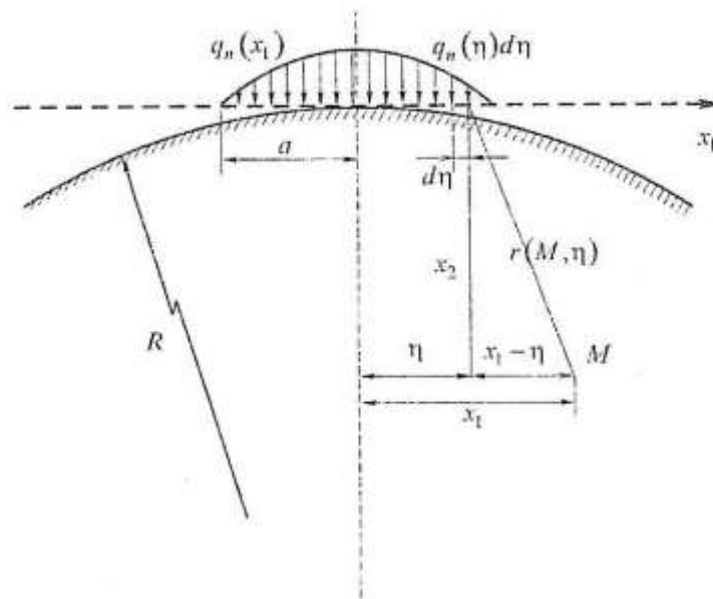
де

$$q_0 = \sqrt{\frac{PE}{2\pi(1-\mu^2)R \cdot b}}; \\ a = \sqrt{\frac{8(1-\mu^2)P \cdot R}{\pi \cdot E \cdot b}} \quad (6)$$

Залежності (6) записані для колеса з такими параметрами:

$$R = 0,5 \text{ м}; b = 0,1 \text{ м}; \mu = 0,3; E = 2 \cdot 10^{11} \text{ н/м}^2,$$

де  $a$  і  $b$  - довжина і ширина зони контакту (рис. 3).

Рис. 3. Основні позначення для зони дії контактної навантаження  $q(x_1)$ 

Для проведення розрахунків і побудови діаграм зручним є перехід від розмірного розподіленого контактної навантаження (5) до безрозмірного. Для цього обидві частини виразу (5) слід поділити на середнє значення зовнішнього навантаження

$q_{cp} = \frac{P}{2ab}$ . Тоді для прийнятих параметрів колеса вираз (5) набуває вигляду

$$\tilde{q}^p(x_1) = \frac{2}{\pi} \sqrt{1 - \left(\frac{x_1}{a}\right)^2}. \quad (7)$$

Маючи формулу (7), рис. 3 і компоненти напружень від зосередженої сили (4) і використовуючи принципи суперпозиції, отримаємо вирази безрозмірних контактних напружень від дії безрозмірного навантаження  $\tilde{q}^p(x_1)$  для довільної точки М пружної напівплощини:

$$\left. \begin{aligned} \tilde{\sigma}_{11}^p(x_1, x_2) &= -\frac{2}{\pi} \int_{-a}^a \frac{\sqrt{1 - \left(\frac{\eta}{a}\right)^2} \cdot (x_1 - \eta)^2 \cdot x_2 \cdot d\eta}{\left[(x_1 - \eta)^2 + x_2^2\right]^2}; \\ \tilde{\sigma}_{22}^p(x_1, x_2) &= -\frac{2}{\pi} \int_{-a}^a \frac{\sqrt{1 - \left(\frac{\eta}{a}\right)^2} - x^3 \cdot d\eta}{\left[(x_1 - \eta)^2 + x_2^2\right]^2}; \\ \tilde{\sigma}_{12}^p(x_1, x_2) &= -\frac{2}{\pi} \int_{-a}^a \frac{\sqrt{1 - \left(\frac{\eta}{a}\right)^2} - (x_1 - \eta)^2 \cdot x_2 \cdot d\eta}{\left[(x_1 - \eta)^2 + x_2^2\right]^2}. \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

Формули (8) обчислюються за допомогою прикладної математичної програми MAPLE-18. Результати обчислення зображуються у вигляді тримірних епюр відносних напружень  $\tilde{\sigma}_{1,1}^p, \tilde{\sigma}_{1,2}^p, \tilde{\sigma}_{2,2}^p$  для колеса в зоні дії відносного навантаження  $\tilde{q}^p(x_1)$  (рис. 4).

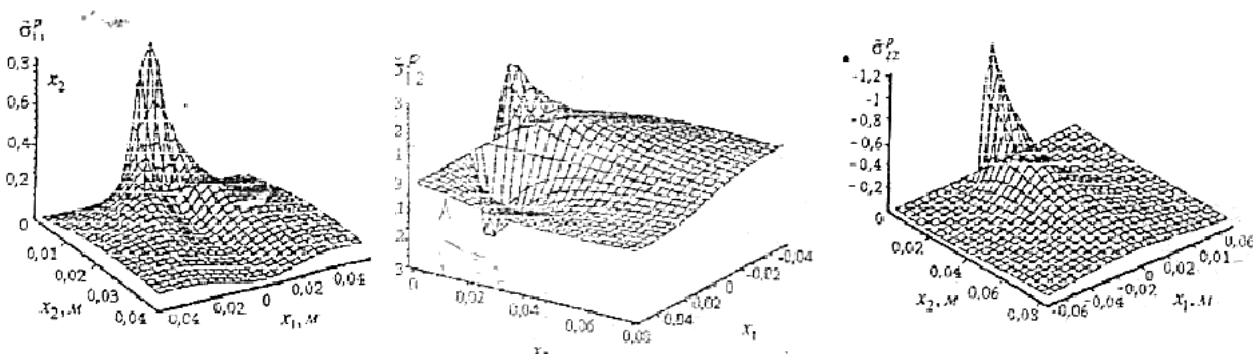


Рис. 4. Тримірні епюри відносних напружень

$\tilde{\sigma}_{1,1}^p, \tilde{\sigma}_{1,2}^p, \tilde{\sigma}_{2,2}^p$  від дії зовнішнього контактного навантаження  $\tilde{q}^p(x_1)$

- серед трьох контактних напружень найбільш вагомим виявилось нормальне напруження  $\tilde{\sigma}_{1,1}^p$ , максимальна величина якого перевищує напруження  $\tilde{\sigma}_{2,2}^p, \tilde{\sigma}_{1,2}^p$  на 20-30 %.

Аналіз отриманих епюр контактних напружень дає можливість зробити такі висновки:

Розглянемо дію зосередженої сили Т, яка дотична до межі напівплощини. Зовнішнє дотичне

- розподіл контактних напружень носить яскраво виражену асиметрию. Навантаження Т в зоні контакту є результатом дії сил тертя при взаємодії колеса з рейкою і, за законом

Кулона, зображується через нормальну силу  $P$  і вищенаведеним алгоритмом отримаємо вирази коефіцієнт тертя  $f$ , тобто  $T = f \cdot P$ . компонентів напруження

Використовуючи потенціальну функцію

$$\tilde{\Phi}_{(\tau, \theta)}^{\tau} = \frac{T}{\pi} \cdot r \cdot \theta \cdot \cos \theta, \quad \text{надалі за}$$

$$\left. \begin{aligned} \tilde{\sigma}_{11}^T(x_1, x_2) &= -f \frac{2}{\pi} \int_{-a}^a \frac{\sqrt{1 - \left(\frac{\eta}{a}\right)^2} \cdot (x_1 - \eta)^3 \cdot d\eta}{\left[(x_1 - \eta)^2 + x_2^2\right]^2}; \\ \tilde{\sigma}_{22}^T(x_1, x_2) &= -f \frac{2}{\pi} \int_{-a}^a \frac{\sqrt{1 - \left(\frac{\eta}{a}\right)^2} \cdot (x_1 - \eta) \cdot x_2^2 \cdot d\eta}{\left[(x_1 - \eta)^2 + x_2^2\right]^2}; \\ \tilde{\sigma}_{12}^p(x_1, x_2) &= -f \frac{2}{\pi} \int_{-a}^a \frac{\sqrt{1 - \left(\frac{\eta}{a}\right)^2} \cdot (x_1 - \eta)^2 \cdot x_2 \cdot d\eta}{\left[(x_1 - \eta)^2 + x_2^2\right]^2}. \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

За допомогою програми MAPLE-18 були обчислені формули (9) і побудовані тримірні епюри відносних напружень  $\tilde{\sigma}_{1,1}^T, \tilde{\sigma}_{1,2}^T, \tilde{\sigma}_{2,2}^T$  (рис. 5).

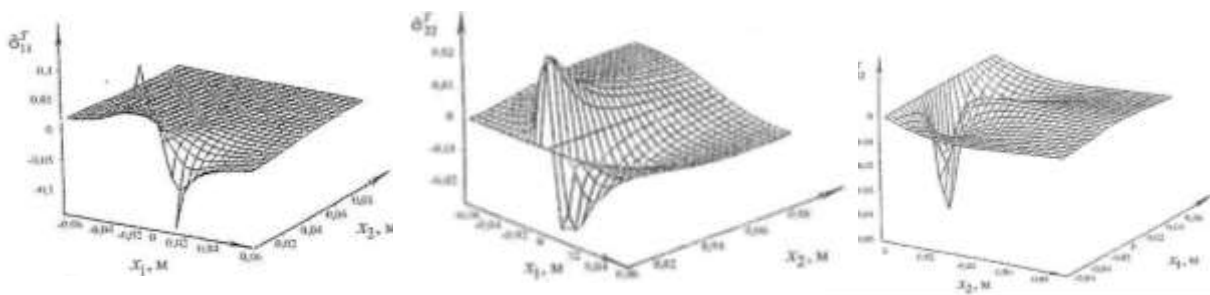


Рис. 5. Тримірні епюри відносних напружень  $\tilde{\sigma}_{1,1}^T, \tilde{\sigma}_{1,2}^T, \tilde{\sigma}_{2,2}^T$  із зовнішнього контактного навантаження

$$\tilde{q}^T(x_1)$$

Графіки напружень від дії зовнішнього дотичного навантаження мають незвичайні форми. Також слід відзначити, що максимальні значення

$\tilde{\sigma}_{1,1}^T$  майже втричі перевищують максимальні значення напружень  $\tilde{\sigma}_{2,2}^T, \tilde{\sigma}_{1,2}^T$ .

Розглянемо сумісну дію нормальних і дотичних навантажень. Реально напружено-деформований стан зони контакту колеса з рейкою визначає сумісна дія нормального і дотичного навантаження.

Відповідні напруження визначаються за формулою

$$\sigma_{ij}^{\Sigma} = \tilde{\sigma}_{ij}^P + \tilde{\sigma}_{ij}^T, (i, j = 1, 2). \quad (11)$$

$$\tilde{q}^{\Sigma}(x_1) = \tilde{q}^P(x_1) + \tilde{q}^T(x). \quad (10)$$

У розгорнутому вигляді можна записати

$$\left. \begin{aligned} \tilde{\sigma}_{11}^{\Sigma} &= -\frac{2}{\pi} \int_{-a}^a F(x_1, x_2, \eta) \cdot \left[ (x_1 - \eta)^2 \cdot x_2 + f(x_1 - \eta)^3 \right] d\eta; \\ \tilde{\sigma}_{22}^{\Sigma} &= -\frac{2}{\pi} \int_{-a}^a F(x_1, x_2, \eta) \cdot \left[ x_2^3 + f(x_1 - \eta) \cdot x_2^2 \right] d\eta; \\ \tilde{\sigma}_{12}^{\Sigma} &= -\frac{2}{\pi} \int_{-a}^a F(x_1, x_2, \eta) \cdot \left[ (x_1 - \eta)^2 \cdot x_2^2 + f(x_1 - \eta)^3 \cdot x_2 \right] d\eta, d\epsilon \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

$$F = \frac{\sqrt[1.273]{1 - \left(\frac{\eta}{a}\right)^2}}{\left[ (x_1 - \eta)^2 + x_2^2 \right]}.$$

Обчислення формул (12) і побудову епюр сумарних напружень (рис. 6) проведено за допомогою програми MAPLE-18.

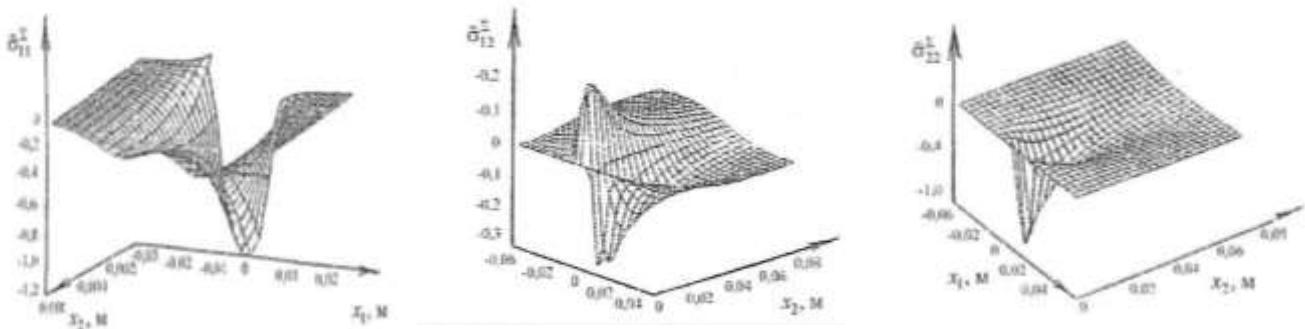


Рис. 6. Тримірні епюри контактних напружень від сумісної дії нормальних і дотичних навантажень

Аналіз епюр дає можливість:

- визначити координати зон появи пластичних деформацій або тріщин елемента системи;
- акцентувати увагу на тому, що найбільш небезпечним є нормальне навантаження, напруження від якого перевищують інші втричі.

Методом кінцевих елементів була побудована

- математична модель контактної задачі системи колеса-рейка, обчислення якої подано як епюри поля напружень, побудовані за допомогою комп'ютерної програми MAPLE-18. Аналіз епюр дає можливість визначити координати зон появи пластичних деформацій або тріщин елемента системи; акцентувати увагу на тому, що

**Висновки.**

найбільш небезпечним є нормальне навантаження, напруження від якого перевищують інші втричі.

Перспективою розвитку дослідження є розв'язання комплексної задачі працездатності системи колесо-рейка – пружна основа рейкового шляху.

#### Список використаних джерел

1. Ковальський Б. С. Допускаемые нагрузки крановых грузовых колес. К 100-летию контактной задачи Герца. Київ: Техніка, 1983. Вип. 19. С. 9-13.
2. Тимошенко С. П. Метод исследования статистических и динамических напряжений в рельсе. Київ: Наукова думка, 1975. 280 с.
3. Кан С. Н., Ингульцов В. Н., Кириченко А. Н. Устойчивость цилиндрических оболочек с подкрепляющим слоем. *Прикладная механика*. Киев, 1972. Т. 5, № 8. С. 50-56.
4. Salo V. A., Rakivnenko V. P., Kirichenko O. M. Calculation of stress concentrations orthotropic cylindrical shells with holes on the basis of a variational method. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2019. V.O.S., № 7(99). P. 11-17.
5. Сладовский А. В. Контактное взаимодействие колес и рельсов: монография. Луганск: «Русь», 2005. 189 с.
6. Кириченко О. М., Раківненко В. П. Опір матеріалів: навч. посіб. Харків: НАНГУ, 2016. 412 с.
7. Кириченко О. М., Гребенік Л. А. Нарисна геометрія, інженерна та комп'ютерна графіка: навч. посіб. Харків: НАНГУ, 2016. 234 с.
8. Попов Г. Я. Контактная задача для линейно-деформированного основания. Киев: Вища школа, 1982. 776 с.
9. Соппротивление материалов / Г. С. Писаренко и др. Киев: Вища школа, 1986. 776 с.
10. Соколовский С. А. Приближенные решения линейных дифференциальных уравнений с переменными коэффициентами, применяемых к задачам строительной механики. *Зб. наукових праць академії ВВ МВС України*. 2014. Вип. 1. С. 86-98.
11. Раківненко В. П., Кириченко О. М. Дослідження несучої здатності металевих конструкцій при наявності в них тріщин. *Зб. наукових праць НАНГУ*. Харків, 2022. С. 104.
12. Тимошенко С. П. Курс теорії упругості. Київ: Наукова думка, 1972. 501 с.

#### A GRAPH-ANALYTICAL APPROACH TO IDENTIFYING THE PERFORMANCE OF THE CHASSIS OF HEAVY VEHICLES THROUGH THE HEEL-RAIL SYSTEM

PhD (Tech.) O. Kirichenko, PhD (Tech.) V. Rakivnenko, PhD (Tech.) A. Kolisnyk

**Abstract.** Since the invention of railway and tracked transport, the problem of determining the conditions of reliability and efficiency of the wheel-rail system has arisen, which was later transformed into a three-dimensional contact problem, the closed analytical solution of which is still missing, but exists only in a semi-imperial form.

The strength of the undercarriage is actually determined by the stress field in the contact zone of the wheel-rail system. For tracked machines, the concept of «wheel-rail» is equated with the «roller-track» system, where the track is a track link.

Using the finite element method using the MAPLE-18 computer program, three-dimensional plots of the stress field of the contact zone for numerical variants of loads were constructed. It turned out that with some combination of loads, the stress plots were unexpected.

The analysis of the plot field makes it possible to establish the predicted zone with the most likely appearance of plastic deformations or cracks, that is, the zone of probable destruction. Therefore, the ephors presented in the work significantly deepen the imagination about the cause and form of possible destruction of a wheel with a rail (or with a caterpillar track of the corresponding machines. The perspective of the development of the research is the solution of the complex problem of the workability of the wheel-rail system - the elastic base of the rail track. The analysis of charts makes it possible to: determine the coordinates of the zones of appearance of plastic deformations or cracks of the system element; emphasize the fact that the most dangerous is the normal load, the stress from which exceeds the others by three times.

The perspective of the development of the research is the solution of the complex problem of the workability of the wheel-rail system - the elastic base of the rail track.

**Keywords:** *finite element method, program MAPLE-18, wheel-rail system, railway transport contact stress area, railway transport.*

Кириченко Олександр Миколайович, кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри інженерної механіки Національної академії Національної гвардії України. ORCID ID [0000-0001-9136-7593]. E-mail: [Akirichenko987@gmail.com](mailto:Akirichenko987@gmail.com).

Раківненко Валерія Павлівна, кандидат технічних наук, доцент, зав. кафедрою інженерної механіки Національної академії Національної гвардії України. ORCID ID [0000-0002-6136-6191]. E-mail: [Valeryrakivnenko@gmail.com](mailto:Valeryrakivnenko@gmail.com).

Колісник Аліна Володимирівна, кандидат технічних наук, доцент кафедри залізничних станцій та вузлів Українського державного університету залізничного транспорту. ORCID ID [0000-0001-5038-0230]. Тел.: 093-734-41-20. E-mail: [kolisnuk@kart.edu.ua](mailto:kolisnuk@kart.edu.ua).

Kirichenko Oleksandr, PhD (Tech.), Associate Professor, department of Engineering Mechanics, National Academy of the National Guard of Ukraine. ORCID ID [0000-0001-9136-7593]. E-mail: [Akirichenko987@gmail.com](mailto:Akirichenko987@gmail.com).

Rakivnenko Valeriya PhD (Tech.), Associate Professor, head of the department of Engineering Mechanics, National Academy of the National Guard of

Ukraine. ORCID ID [0000-0002-6136-6191]. E-mail: [Valeryrakivnenko@gmail.com](mailto:Valeryrakivnenko@gmail.com).

Kolisnyk Alina, PhD (Tech.), Associate Professor, department of railway stations and units, Ukrainian State University of Railway Transport ORCID ID [0000-0001-5038-0230]. Tel.: 093-734-41-20. E-mail: [kolisnuk@kart.edu.ua](mailto:kolisnuk@kart.edu.ua).

СИТНИК Б. Т., кандидат технічних наук, доцент (Український державний університет залізничного транспорту)

МІРОШНИК А. М., аспірант кафедри «Автоматика та управління у технічних системах, АУТС», НТУ «ХПІ»

## Структурно-параметрична індексна ідентифікація в адаптивних системах управління рухомими об'єктами

*Розроблено нову модель індексної ідентифікації структури та параметрів складного динамічного рухомого об'єкта для побудови адаптивних систем управління з корекцією поточних параметрів налаштування цифрових регуляторів.*

**Ключові слова:** індексна ідентифікація, адаптивна система управління, високошвидкісний рух поїздів, енергозбереження.

### Вступ

Підвищення якості експлуатаційних характеристик систем автоматичного управління складними високошвидкісними рухомими об'єктами рейкового транспорту пов'язане з необхідністю ідентифікації та адаптації, забезпеченням безпеки та здоров'я навченого персоналу, високою швидкістю обладнання та уповільненою реакцією операторів, обумовленою обмеженими фізичними можливостями людини.

### Аналіз наявних рішень

Переважна більшість сучасних наукових досліджень і промислових реалізацій адаптивних систем управління (АСУ) присвячена створенню робастних, нейрподібних, нечітких, інтелектуальних фільтрів і регуляторів [1-3].

Адаптивні АСУ та активні експертні системи (АЕС) [2, 3] знаходять застосування як системи управління складними нестационарними та багатовимірними об'єктами, підтримують функціонування систем у стохастичному та хаотичному світах, що суттєво покращує їхні характеристики надійності та техніко-економічні показники. За наукову основу досліджень було взято роботи Бесекерського В. А., Загарія Г. І., Заде Л. А., Лазаряна В. А., Поспелова Д. А., Мамдані Е. А., Ципкіна Я. З. Роботи цих і багатьох інших

учених [1-11] створили методичні та теоретичні передумови розвитку теорії адаптивних АСУ.

### Мета дослідження

Метою дослідження є розроблення нової моделі індексної ідентифікації структури та параметрів складного рухомого об'єкта для побудови адаптивних систем управління з корекцією поточних параметрів налаштування в кожному перехідному процесі роботи об'єкта.

### Постановка задачі

Завданням дослідження є забезпечення ідентифікації динамічних параметрів інерційних об'єктів  $T_0 = i * T_i$  і  $k_0 = K(j)$  шляхом введення додаткових  $m_i$ ,  $K_j$  елементів організації самоналаштування моделей і забезпечення визначення значень цих параметрів за критерієм оцінювання близькості структури і параметрів моделі та об'єкта за вибором мінімуму модулів сигналів помилок, що формуються на виходах об'єкта і відповідних виходах  $i$ ,  $j$  блоків модулів у кожному перехідному процесі роботи об'єкта.

### Основний матеріал

Відповідно до робіт Лазаряна В. А. [1] потяг може бути поданий як локомотив (пристрій управління та виконавчий механізм (ВМ)) і послідовність вагонів різної довжини та маси (об'єкт управління) (рис. 1).

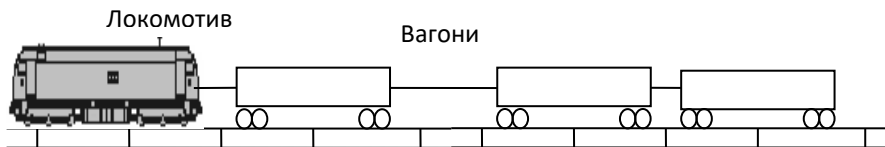


Рис. 1. Схема рухомого об'єкта як об'єкта управління

Електричною моделлю об'єкта може бути послідовність аперіодичних ланок з різними постійними часу і статичними коефіцієнтами передач [1, 2]. Ланки з більшими постійними часу можуть замінюватися ланками з меншими постійними часу. Кількість ланок з меншою постійною часу може дорівнювати найбільшому цілому від ділення найбільшої постійної часу моделі на найменшу, відповідну моделі найлегшого вагона.

Загальним недоліком відомих систем ідентифікації з використанням моделі [2-8] є незмінність структури моделі, що налаштовується, підключеної паралельно досліджуваному об'єкту, значні витрати часу на обчислення, неодночасність обчислень усіх статичних і динамічних параметрів обраної моделі об'єкта протягом часу одного перехідного процесу.

Розглядаються моделі динамічних об'єктів, структура яких може апроксимуватися математичною моделлю, що містить блок множення *Produkt3* (рис. 2-5) з необхідним значенням коефіцієнта посилення об'єкта  $k_0$ , аперіодичною ланкою з постійною часу об'єкта  $T_0$  та  $i$  аперіодичних ланок  $m_1, m_2, m_3, m_4, m_5 \dots m_i$  з постійними часу  $T_i$ , на виході кожної з яких

встановлені блоки підсилювачів  $K_1, K_2, K_3, K_4, K_5 \dots K_j$ . Кожен блок підсилювачів  $K_j$  (рис. 6) містить  $j$  підсилювачів  $Gain_j$  з коефіцієнтами посилення  $K_{ij}$  від 0.1 до 1. На перші входи  $In1$  кожного блока  $K_j$  подається сигнал  $Y_{mi}$  з виходів відповідних аперіодичних ланок  $m_i$ , а на другі входи  $In2$  – вихід моделі  $Y_{OB}$  об'єкта (або вихід об'єкта). На виходах усіх підсилювачів  $K_j$  формуються модулі сигналів помилки  $E(T_i, K_j)$  і мінімальний сигнал модуля помилки  $E_{min}(T_i, K_j) = abs(Y_{mi} - Y_{OB})$ .

У процесі спільної роботи об'єкта і моделі відбувається автоматичне визначення кількості аперіодичних ланок  $i$  та розрахунок статичного коефіцієнта посилення  $k_m = f(\text{індекс } K_j) * k_0$  об'єкта. Перехідну функцію моделі індексної ідентифікації наведено на рис. 7. Критерієм оцінювання близькості структури і параметрів моделі та об'єкта є вибір мінімуму модуля сигналу помилки  $E_{min}(T_i, K_j)$ , що формується на виходах блоків підсилювачів  $K_1, K_2, K_3, K_4, K_5 \dots K_j$ , підключених до індексного селектора мінімального сигналу *Minimum*.

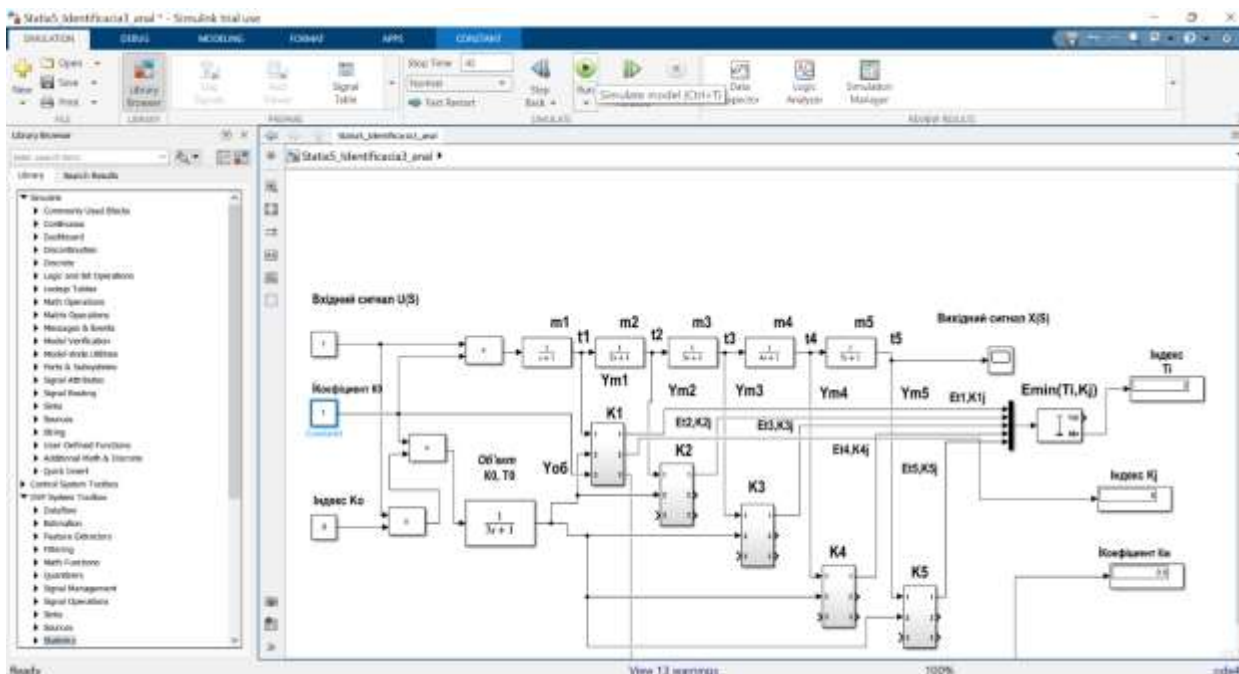


Рис. 2. Структурна схема індексної моделі Simulink об'єкта у вигляді аперіодичної ланки з необхідним значенням коефіцієнта посилення  $k_0=0.8*1=0.8$ , заданим значенням шуканої постійної часу  $T_0=3$  с

Оскільки індекс  $i$  моделі  $i=2$ , то постійна часу моделі  $T_m=T_1+T_2=1$  с+2 с=3 с. У моделі п'ять аперіодичних ланок  $m_1, m_2, m_3, m_4, m_5$  з постійними часу  $T_i=1$  с, 2 с, 3

с, 4 с, 5 с відповідно. Коефіцієнт посилення моделі  $k_m=0.8$ .

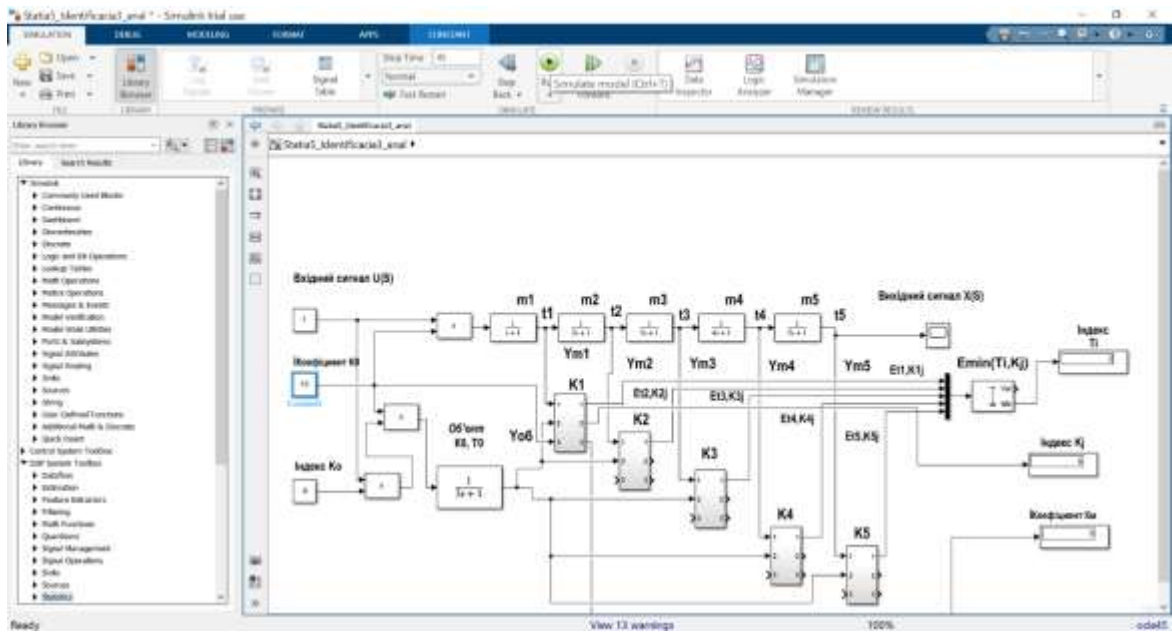


Рис. 3. Структурна схема індексної моделі Simulink об'єкта у вигляді аперіодичної ланки з необхідним значенням коефіцієнта посилення  $k_0=0.8*10=8$ , заданим значенням шуканої постійної часу  $T_0=3$  с і п'яти аперіодичних ланок  $m_1, m_2, m_3, m_4, m_5$  з постійними часу  $T_i=1$  с, 2 с, 3 с, 4 с, 5 с відповідно. Коефіцієнт посилення моделі  $k_m=8$ . Постійна часу моделі  $T_M=3$  с

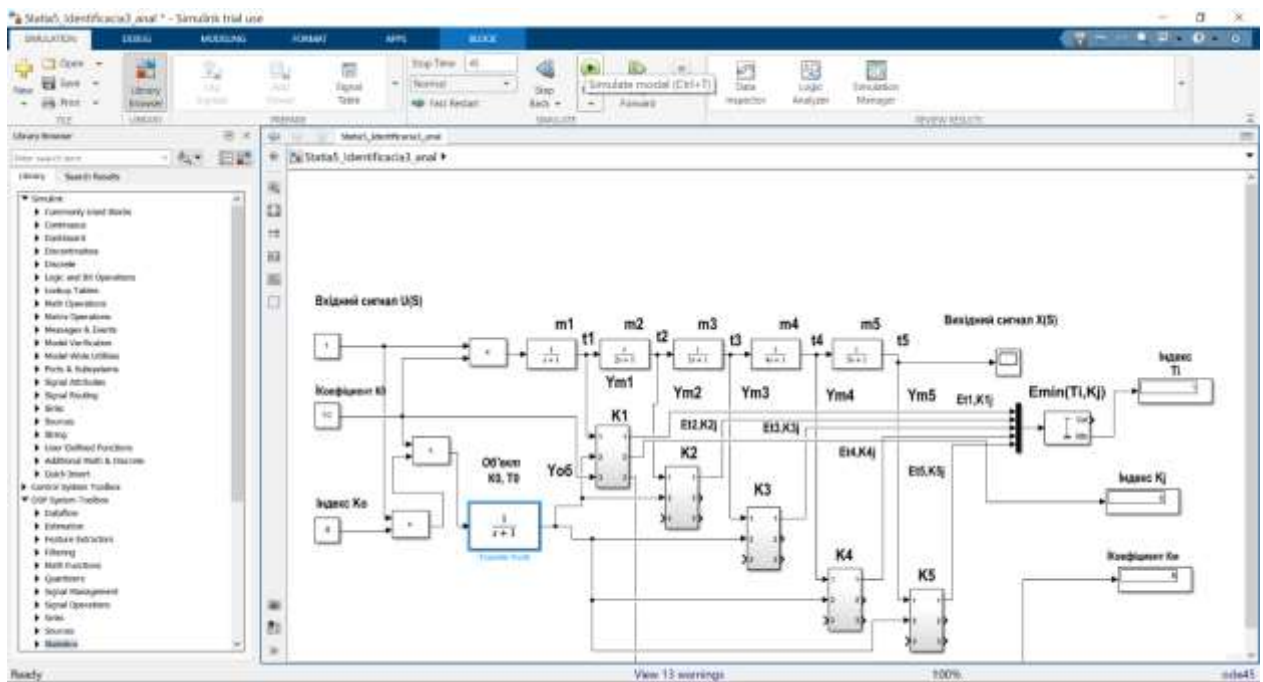


Рис. 4. Структурна схема індексної моделі Simulink об'єкта у вигляді аперіодичної ланки з необхідним значенням коефіцієнта посилення  $k_0=0.8*10=8$ , заданим значенням шуканої постійної часу  $T_0=1$  с і п'яти аперіодичних ланок  $m_1, m_2, m_3, m_4, m_5$  з постійними часу  $T_i=1$  с, 2 с, 3 с, 4 с, 5 с відповідно. Коефіцієнт посилення моделі  $k_m=8$ . Постійна часу моделі  $T_M=1$  с

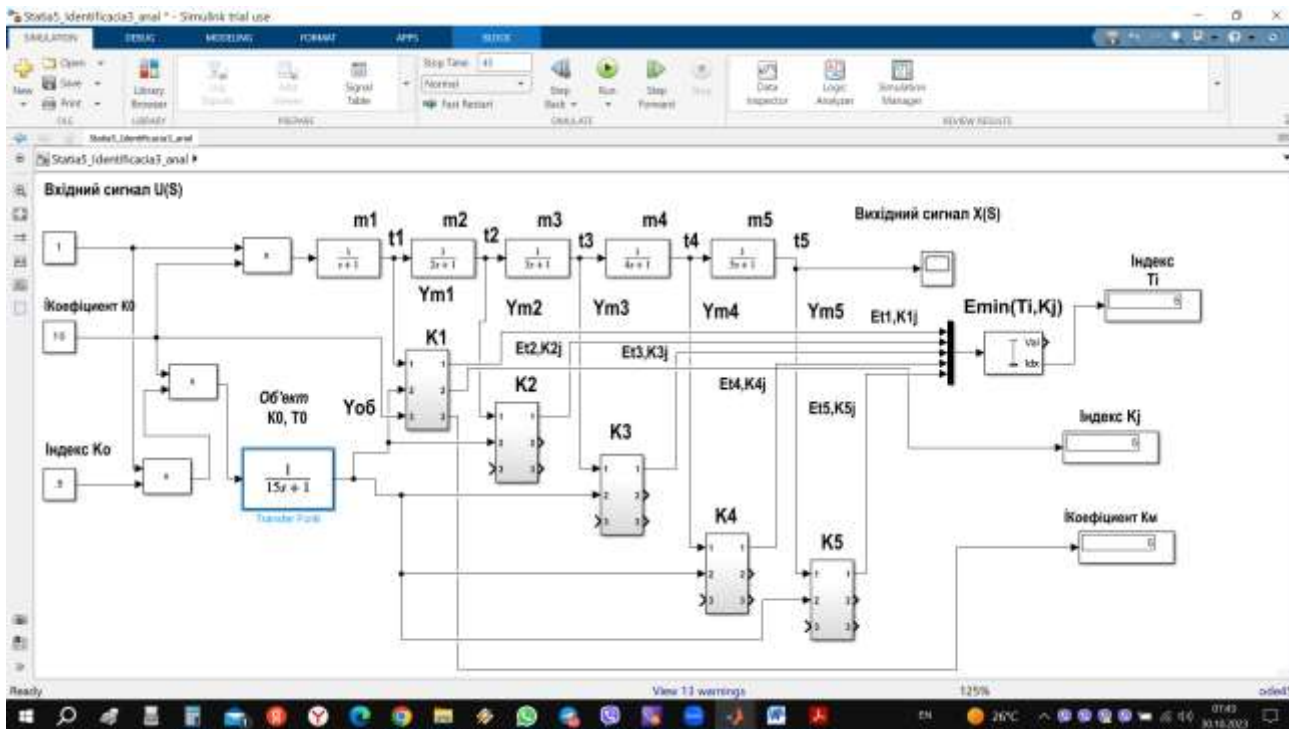


Рис. 5. Структурна схема індексної моделі Simulink об'єкта у вигляді аперіодичної ланки з необхідним значенням коефіцієнта посилення  $k_0=0.5*10=5$ , заданим значенням шуканої постійної часу  $T_0=15$  с і п'яти аперіодичних ланок  $t_1, t_2, t_3, t_4, t_5$  з постійними часу  $T_i=1$  с, 2 с, 3 с, 4 с, 5 с відповідно. Коефіцієнт посилення моделі  $k_M=5$ .  
Постійна часу моделі  $T_M=15$  с

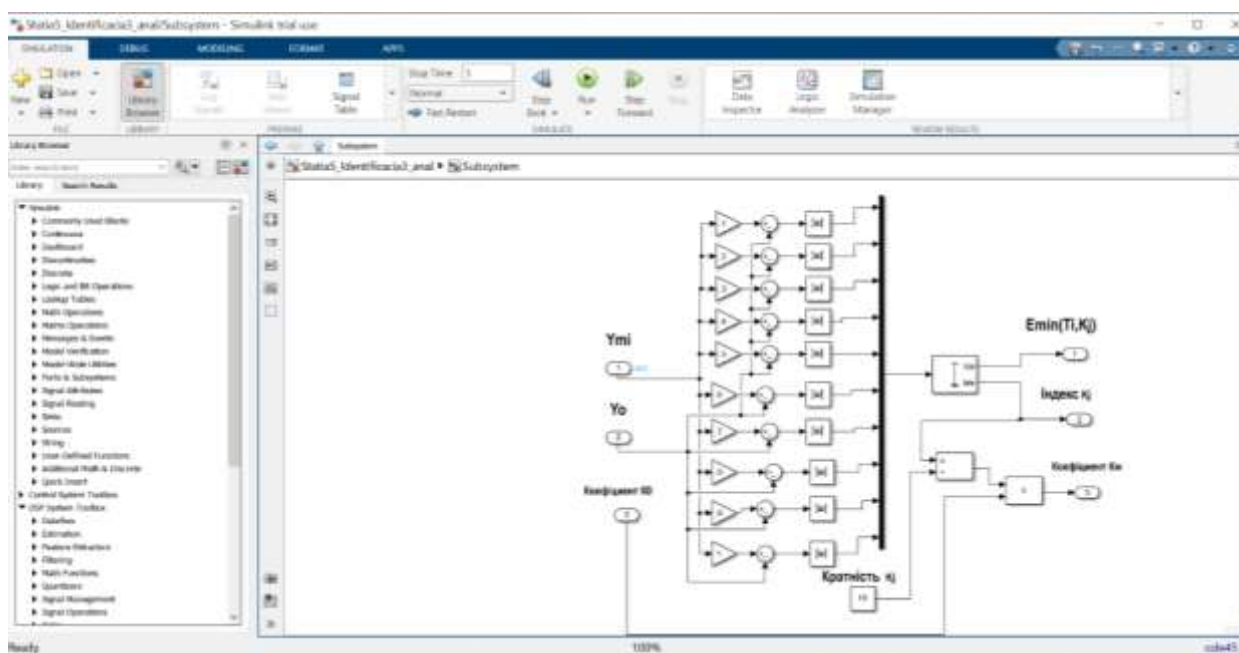


Рис. 6. Структурна схема блока обчислення індексу  $K_j$  і додаткового блока обчислення статичного коефіцієнта посилення моделі об'єкта  $k_M$

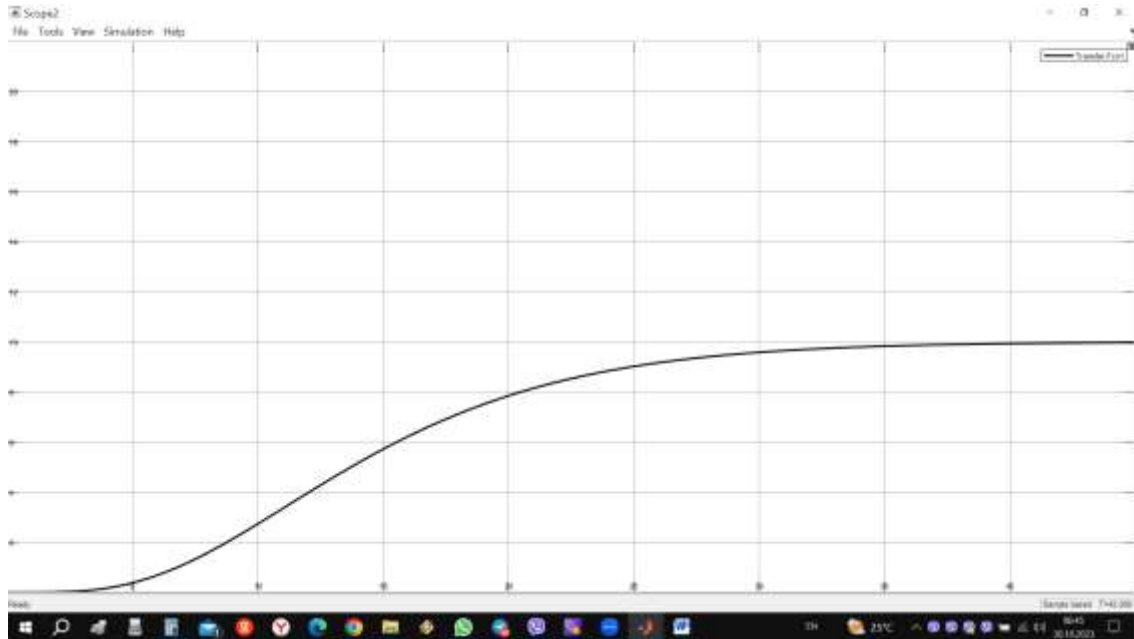


Рис. 7. Перехідна функція моделі індексної ідентифікації

Припустимо, що диференціальне рівняння моделі цього об'єкта зі статичним коефіцієнтом посилення  $k_o$ , як операторного, має вигляд

$$(s^i + a_1 s^{i-1} + \dots + a_i) \cdot x(s) = k_o U(s), \quad (1)$$

де  $U(s)$  - зображення, за Лапласом, керуючого впливу;

$x(s)$  - зображення, за Лапласом, вихідного сигналу об'єкта.

Відомо [2], що для випадку, коли рівняння (1) має речові та одну пару комплексних коренів, справедлива нерівність

$$k_o \cdot [1 + V(t)] \geq h(t) \geq k_o [1 - V(t)],$$

де

$h(t)$  - перехідна функція;

$[1 + V(t)]$  - функція, що обмежує  $h(t)$

зверху;

$[1 - V(t)]$  - функція, що обмежує  $h(t)$

знизу, причому

$$V(t) = e^{-\eta t} \sum_{i=0}^{m-1} \frac{\eta^i t^i}{i!},$$

де  $\eta$  - середньоарифметичний корінь рівняння (1).

Якщо рівняння (1) нормалізовано відносно  $a_i$  так, що  $a_i = 1$ , то в розімкнутій системі (без регулятора)

коефіцієнт  $\frac{a_{i-1}}{i \cdot a_i} = T$  визначає середньоарифметичну

постійну часу об'єкта, а коефіцієнт  $\frac{a_{i-1}}{a_i} = iT$  -

сумарну постійну добу, що характеризує загальну інерційність об'єкта. Значення середньоарифметичного

кореня  $\eta_{c.a.} = \frac{1}{iT}$  визначає постійну складову

швидкості перебігу перехідного процесу в розімкнутій системі, оскільки  $\eta_{c.a.}$  найближче розташований відносно уявної осі комплексної площини коренів, тобто є правою межею всіх коренів.

Припустимо, що в замкнутій системі управління модель об'єкта описується передавальною функцією

$$W_m(s) = \frac{k_o}{(T_i s + 1)^i}, \quad (2)$$

а керуючі впливи формуються у вигляді співвідношення, що відповідає ПІД-закону регулювання,

$$U(t) = k_{II} e(t) + k_{II} \int_0^t e(t) dt + k_D \frac{de(t)}{dt}, \quad (3)$$

де  $e = x_0 - x(t)$  - помилка регулювання,

де  $x_0$  - сигнал задавання регулятора;

$x(t)$  - вихідний сигнал об'єкта.

Дискретному аналогу формули (3) відповідає [3] формула

$$U(nT_k) = \sum_{l=0}^k k_l \cdot e^{l-1}(nT_k)$$

При  $t \in [nT_k, (n+1)T_k]$ ,  $n = \overline{0, \infty}$

керуючий вплив подається одночасно як в об'єкт, так і модель. Управлінню (3) відповідає передатна функція

$$W(s) = k_{II} + \frac{k_{II} s}{2} + \frac{k_{II}}{s}, \quad (4)$$

де  $k_0 = k_{II}$ ,  $k_1 = k_{II}$ ,  $k_2 = k_{II}$  - оптимальні за критерієм максимального ступеня стійкості налаштування цього регулятора [3],

$$k_{II} = \frac{27i}{2T_i k_o} \cdot \frac{(k-1)(k-2)^{k-2}}{(k+1)^{i-1}}, \quad (5)$$

$$k_{II} = \frac{1}{k_o} \cdot \frac{(k-2)^{i-2}}{(k+1)^{i-1}} \cdot (5k-4), \quad (6)$$

$$k_{II} = \frac{T_i}{2k_o} \cdot \left( \frac{k-2}{k+1} \right). \quad (7)$$

Міноранта перехідної функції  $V_3(t)$  у замкнутій системі рівнянь збігається з перехідною функцією  $h_3(t)$  у тому випадку, якщо  $k+1$  - похідна характеристичного рівняння замкнутої системи, що містить цей об'єкт, має корені  $s_1 = -\frac{l}{T_i(k+1)}$

кратності  $k+1$ , тобто виглядає як

$$Q^{k-l-1}(s) \cdot \left( s + \frac{k}{iT_i(k+1)} \right)^{k+1} = 0,$$

де  $Q^{k-l-1}(s) = 0$  - рівняння визначення інших  $k-l-1$  коренів  $l+1$  похідної характеристичного рівняння замкнутої системи, що дорівнюють  $s_2 = \frac{1}{T_o}$ .

У цьому випадку  $(k+1)$  - кратний корінь  $k+1$  похідної характеристичного рівняння  $s_1$  замкнутої системи рівняння, визначається кількістю ланок моделі  $i$ , кратністю  $k$  і постійною часу  $T_i$ . Якщо  $i > l$ , то  $s_1 < s_2$ , тобто корені  $s_1$  розташовані ближче до уявної осі.

За координатами  $i$  та  $j$  вузлової точки моделі, яким відповідає мінімальна помилка порівняння  $E_{min}(E_{ij}, K_{ij})$  (мінімум модуля помилки ідентифікації), знаходимо значення  $T_o = i * T_i$  і величину  $k_o$ , необхідні для налаштування поточних параметрів налаштування регуляторів (5), (6), (7) у кожному перехідному процесі.

На рис. 2 наведено результати моделювання процесу ідентифікації об'єкта  $T_o$  і  $k_o$ .

Аналіз показань цифрових вольтметрів на рис. 2 показує ідентифікацію параметрів об'єкта (постійна часу об'єкта  $T_o=3$  с і статичний коефіцієнт передавання

$k_o=0.8$ ). Індеси моделі  $i=2, j=8$  для  $T_o=3$  с відповідають  $T_m=T_1+T_2=3$  с і значенню її статичного коефіцієнта передавання

$k_m = K(j) = K_{28} = 0.8 * 1 = 0.8$  за час моделювання 45 с.

Аналіз показань цифрових вольтметрів на рис. 3 показує ідентифікацію параметрів об'єкта (постійна часу об'єкта  $T_o=3$  с і статичний коефіцієнт передавання  $k_o=8$ ). Індеси моделі  $i=2, j=8$  для  $T_o=3$  с відповідають  $T_m=T_1+T_2=3$  с і значенню її статичного коефіцієнта передавання  $k_m = K(ij) = K_{28} = 0.8 * 10 = 8$  за час моделювання 45 с.

Аналіз показань цифрових вольтметрів на рис. 4 показує ідентифікацію параметрів об'єкта (постійна часу об'єкта  $T_o=1$  с і статичний коефіцієнт передавання  $k_o=8$ ). Індеси моделі  $i=1, j=8$  для  $T_o=1$  с відповідають  $T_m=T_1=1$  с і значенню її статичного коефіцієнта передавання  $k_m = K(ij) = K_{18} = 8$  за час моделювання 45 с.

Аналіз показань цифрових вольтметрів на рис. 5 показує ідентифікацію параметрів об'єкта (постійна часу об'єкта  $T_o=15$  с і статичний коефіцієнт передавання  $k_o=8$ ). Індеси моделі  $i=5, j=8$  для  $T_o=15$  с відповідають  $T_m=T_1+T_2+T_3+T_4+T_5=1+2+3+4+5=15$  с і значенню її статичного коефіцієнта передавання  $k_m = K(ij) = K_{58} = 8$  за час моделювання 45 с.

Підвищити точність ідентифікації можна через збільшення кількості аперіодичних ланок, зменшення значень їхніх постійних часу  $T_i$ , а також збільшення кількості блоків обчислення індексу  $K_j$  і статичного коефіцієнта посилення моделі об'єкта  $K_m$ .

### Висновки

Запропоновано нову модель індексної ідентифікації структури та параметрів складного рухомого об'єкта для побудови адаптивних систем управління з корекцією поточних параметрів налаштування регуляторів. Кількість ланок  $i$  (структура) моделі та координата  $j$  (адреса значення її статичного коефіцієнта передавання) є змінними величинами, і їхні зміни враховуються в адаптивних системах управління шляхом корекції поточних параметрів налаштування регуляторів за формулами (5)-(7) у кожному перехідному процесі.

Перспективами подальшого розроблення в цій галузі є:

- реалізація цього методу та моделей програмним способом;
- створення програмних моделей спільного дослідження моделей індексної ідентифікації,

пристроїв розрахунку оптимальних параметрів корекції цифрових регуляторів за критеріями максимального або гарантованого ступеня стійкості, цифрових регуляторів з можливістю введення сигналів корекції, цифро-аналогових моделей об'єктів із змінними параметрами, станцій керування регуляторами з можливістю ненаголошеного введення пробних сигналів у ручному та автоматичному режимах роботи, адаптивних фільтрів, програм реалізації перешкод із заданими законами розподілу випадкових сигналів.

## Список використаних джерел

1. Лазарян В. А. Динамика транспортных средств. Избранные труды. Киев: Наукова думка, 1985. 528 с.
  2. Бесекерский В. А., Попов Е. П. Теория систем автоматического регулирования. Изд. 3-е, доп. Москва: Наука, 1975.
  3. Загарий Г. И., Шубладзе А. М. Синтез систем управления на основе критерия максимальной степени устойчивости. Москва: Энергоатомиздат, 1988. 104 с.
  4. Адаптивные системы идентификации / А. Г. Кику, В. И. Костюк, В. Е. Краскевич и др. Киев: Техніка, 1975. 288 с.
  5. Дейч А. М. Методы идентификации динамических объектов Москва: Энергия, 1979. 240 с.
  6. Растрин Р. А., Маджаров Н. Е. Введение в идентификацию объектов управления. Москва: Энергия, 1977. 216 с.
  7. Марков С. И., Минаев В. М., Артамонов Б. Н. Идентификация параметров колебательных систем автоматического регулирования. Ленинград: Энергия, 1975. 96 с.
  8. Сытник Б. Т., Курцев М. С., Михайленко В. С. Структурно-параметрическая идентификация в адаптивных системах управления движением поездов. *Информационно-управляющие системы на железнодорожном транспорте*. 2014. № 3. С. 17-21. URL: [http://nbuv.gov.ua/UJRN/Ikszt\\_2014\\_3\\_4](http://nbuv.gov.ua/UJRN/Ikszt_2014_3_4).
  9. Моделі і методи створення систем реалізації графіків руху високошвидкісних поїздів з адаптивною корекцією швидкості за фактичними параметрами проїзду. Ч. 1. Структура автоматичної системи нечіткого задання графіка швидкості руху рухомого об'єкта з її корекцією за фактичними параметрами проїзду /Ситнік Б. Т., Бриксін В. О., Ломотько Д. В. та ін. *Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті*. Харків, 2021. № 4. С. 24–35. URL: <https://doi.org/10.18664/ikszt.v26i4.247>
  - 235.
  10. Ситнік Б. Т., Бриксін В. О., Давидов І. В. Моделі і методи створення систем реалізації графіків руху високошвидкісних поїздів з адаптивною корекцією швидкості за фактичними параметрами проїзду. Ч. 2. Аналіз способів управління швидкістю поїзда з тяговими двигунами постійного та змінного струму. *Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті*. Харків, 2022. № 1. С. 3–18. URL: <https://doi.org/10.18664/ikszt.v27i1.254087>.
  11. Ситнік Б. Т., Бриксін В. О., Давидов І. В. Моделі і методи створення систем реалізації графіків руху високошвидкісних поїздів з адаптивною корекцією швидкості за фактичними параметрами проїзду. Ч. 3. Синтез структури і моделювання адаптивних цифрових регуляторів корекції швидкості руху високошвидкісних поїздів із заданими ПД-законами формування імпульсних управлінь. *Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті*. Харків, 2022. № 3. С. 35–48. DOI: 10.18664/ikszt.v27i3.265542. URL: <http://jiks.kart.edu.ua/issue/view/15894>, <http://lib.kart.edu.ua/handle/123456789/11256>.
- Ключові слова:** індексна ідентифікація, адаптивна система управління, високошвидкісний рух поїздів, енергозбереження.
- Ситнік Б., Мірошник А. Структурно-параметрична ідентифікація в адаптивних системах управління рухом поїздів.** Розроблено нову модель ідентифікації структури й параметрів складного рухливого об'єкта рейкового транспорту для побудови адаптивних систем управління з корекцією поточних параметрів налаштування цифрових регуляторів.
- Ключові слова:** ідентифікація, адаптивна система управління, високошвидкісний рух поїздів, енергозбереження.
- 
- Sytnik B., Miroshnyk A. Structural and parametric identification in adaptive systems of train dispatching.** A new model of structure and parameters identification of a complex rail moving object for the construction of adaptive control systems with the correction of current settings of digital regulators has been designed.
- Keywords:** identification, adaptive control system, high-speed traffic, energy saving.
- 
- Ситнік Борис Тимофійович,** кандидат технічних наук, доцент, м. Харків, Україна. E-mail: [bts12021947@gmail.com](mailto:bts12021947@gmail.com) <http://orcid.org/0000-0002-9664-5617>.
- Мірошник Анатолій Миколайович,** аспірант кафедри автоматики та управління у технічних системах, НТУ «ХПІ», м. Харків, Україна. E-mail: [anatolii.miroshnyk@nure.ua](mailto:anatolii.miroshnyk@nure.ua) <https://orcid.org/0000-0001-5702-9611>.
- Sytnik Borys, Ph.D., associate professor, Ukrainian State University of Railway Transport, Kharkiv, Ukraine.** E-mail: [bts12021947@gmail.com](mailto:bts12021947@gmail.com), <http://orcid.org/0000-0002-9664-5617>.
- Miroshnyk Anatolii, graduate student of the department "Automation and control in technical systems, NTU «KhPI», Kharkiv, Ukraine.** E-mail: [anatolii.miroshnyk@nure.ua](mailto:anatolii.miroshnyk@nure.ua) <https://orcid.org/0000-0001-5702-9611>

ПРОДАЩУК С. М., к.т.н., доцент (Український державний університет залізничного транспорту)

ШАПАТІНА О. О., к.т.н., доцент (Український державний університет залізничного транспорту)

ТРОЯН Д. О., аспірант (Український державний університет залізничного транспорту)

КВАСОВ П. В., аспірант (Український державний університет залізничного транспорту)

ЛЯШКО Ю. А., магістрант (Український державний університет залізничного транспорту)

## Удосконалення технології переробки контейнерів у сучасних умовах

*За останні роки значно зросли контейнерні перевезення, які розвиваються швидкими темпами і сприяють підвищенню конкурентоспроможності залізничного транспорту. У статті розглянуто питання, присвячені підвищенню ефективності застосування сучасних технологій переробки контейнерів в Україні.*

*З урахуванням цього досліджено сучасні інноваційні методи, використовувані при перевезенні та обробці контейнерів за кордоном. Обґрунтовано ефективність використання ричстакерів замість козлових кранів при обробці контейнерів на контейнерному терміналі відповідно до сучасних реалій.*

**Ключові слова:** контейнер, ричстакер, козловий кран, залізничний транспорт.

### Постановка проблеми.

Як показала практика, одним із перспективних напрямів розвитку залізничної галузі є контейнерні перевезення, які сприяють підвищенню енергоефективності, екологічності та безпеці перевезень.

На сьогодні через воєнний стан Україна знаходиться в складних умовах, інфраструктура частково окупована та перебуває під обстрілами, що ускладнює роботу всіх транспортних об'єктів, у тому числі і контейнерних терміналів. Так, контейнерному терміналу доводиться працювати за скороченим графіком (16 год замість 24) в умовах перебоїв електропостачання, що унеможливує роботу козлових кранів і тим самим призводить до збільшення простоїв контейнерів на терміналах і їхнього накопичення.

Через це постає проблема забезпечення раціонального використання наявних контейнерів і зменшення простою порожніх і нерозвантажених.

Отже, для вирішення цієї проблеми необхідно удосконалити технологію роботи з переробки контейнерів за рахунок використання більш електронезалежних технологій.

### Аналіз останніх досліджень і публікацій.

Дослідженнями технології контейнерних перевезень залізничним транспортом в Україні займалися такі вчені, як Бердниченко Ю., Бех П. В., Котенко А. М., Ломотько Д. В., Мямлін С. С., Огороков А. М., Слободян В. В., Стрелко О. Г. та ін.

Щодня залізниця для перевезення українських вантажів опрацьовує нові маршрути у країни Західної Європи, де особливе значення мають контейнерні перевезення [1].

У дослідженнях [2-4] доведено перспективність контейнерних перевезень в Україні, особливо при збільшенні вантажних потоків у країни Європейського Союзу. Однак зазначається, що інфраструктура контейнерних перевезень потребує удосконалення та модернізації.

А в дослідженні [5] зазначається, що для підвищення ролі залізничних перевезень потрібно удосконалити конструкції рухомого складу для перевезення контейнерів відповідно до міжнародних стандартів.

Отже, для ефективної організації контейнерних перевезень потрібна модернізація транспортних споруд і засобів, інформаційного забезпечення та запровадження енергоефективних технологій.

### Визначення мети та завдання дослідження.

Метою дослідження є обґрунтування ефективної технології переробки контейнерів у сучасних умовах.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі завдання:

- проаналізувати сучасні технології переробки контейнерів;
- обрати раціональну технологію переробки контейнерів на контейнерному терміналі.

**Викладення основного матеріалу дослідження.**

На сьогодні більшість об'єктів залізничної інфраструктури потребують ремонту і модернізації, удосконалення технологічних процесів.

Операції з навантаження і розвантаження напівпричепів на платформу відбуваються так: вантажівка з напівпричепом заїжджає на розширену рампу, розташовану на спеціальному майданчику, після цього вантажівка відчіплює напівпричіп і їде, а рампа разом з напівпричепом за допомогою тяги акумуляторів починає рухатися горизонтально вліво, поки повністю не стане на контрейлерну платформу. Відповідно розвантаження відбувається у зворотному порядку [6].

Американські фахівці з компанії Parallel Systems розробили безпілотну вагонну платформу для автоматизації залізничних вантажоперевезень. Вона може рухатися як самостійно, так і в парі з іншою платформою для перевезення вантажного контейнера.

Запропонований Parallel Systems підхід здатний прискорити перевезення невеликих вантажів і зробити цей процес економічно доцільним. Запровадження такої технології сприяє забезпеченню безпечного перевезення, оскільки робовагони здатні розпізнати перешкоду на колії та почати гальмування в оптимальному режимі, ніж це робить локомотивна бригада. За необхідності такі вагони зможуть

За кордоном впроваджена значна кількість інноваційних методів при перевезенні та обробці контейнерів. Так, Асоціація польських фахівців та інженерів (SITK) розробила модель контрейлерної системи Mark II.

автоматично розчіплюватися на перехрестях, аби пропустити машини екстреної допомоги [7].

Також цікавий проєкт Hyperloop Transportation Technologies, що запропонувала вантажну версію гіперзвукового поїзда. В основі проєкту лежить запропонована Ілоном Маском ідея вакуумного гіперзвукового поїзда – це готове до використання рішення для портів операторів, призначене для переміщення вантажів «за хвилини на сотні кілометрів». При цьому швидкість транспортних капсул досягатиме 600 км/год. Такий проєкт гарантує підвищення енергоефективності та пропускної здатності з одночасним зниженням негативного впливу на навколишнє середовище [8].

Для удосконалення технології роботи контейнерного терміналу станції при переробці контейнерів запропоновано використання пересувних перевантажувальних машин і пристроїв (ричстакерів) замість стаціонарних кранів.

Ричстакер – це навантажувач, призначений для роботи з контейнерами (рис. 1), являє собою машину великого розміру, здатну працювати з вантажами до 45 т.

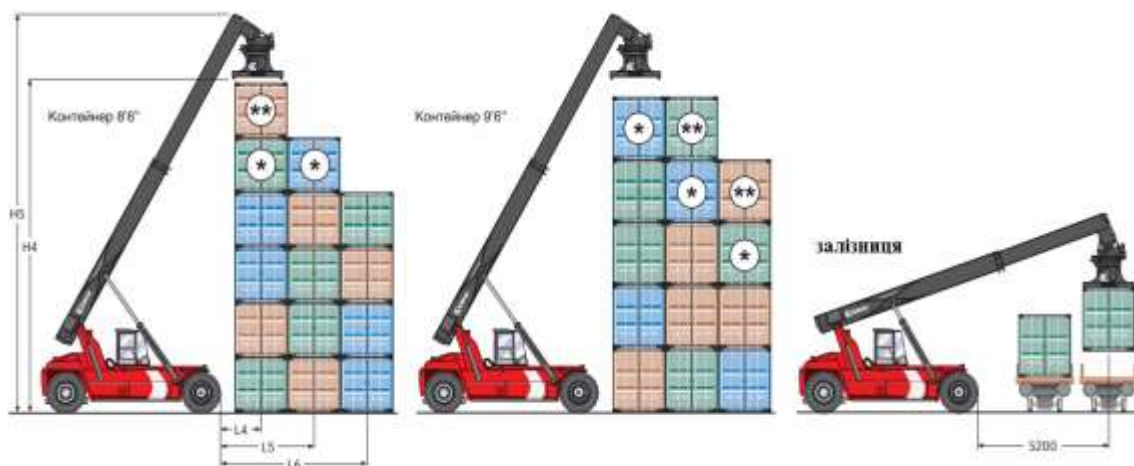


Рис. 1. Ричстакер Kalmar серії DRF

Перевагами такої технології буде відсутність підкранових колій, мережі силової електроенергії; розширення та простота реконструкції контейнерного майданчика в разі його пошкодження; значне підвищення надійності безперервної роботи; необмежена зона дії, висока маневреність по всьому майданчику на контейнерному терміналі [9]. Наведено схему розміщення контейнерів на майданчику, оснащеному козловим краном (рис. 2, а) і ричстакером (рис. 2, б). Наприклад, у разі пошкодження критичної інфраструктури та подачі електроенергії за графіком 2 год вимкнене світло/4 год увімкнене (з 12 год простій до 4 год) або 4 год/2

год (простій до 8 год) електрозалежний кран буде у простої, тобто працювати з 12 год дозволеного часу він буде 8 або 4 год, а у випадку блекауту не зможе працювати зовсім. Ричстакер електронезалежний, тому він буде працювати незалежно від стану електромережі, не зупиняючи процес обробки контейнерів на терміналі.

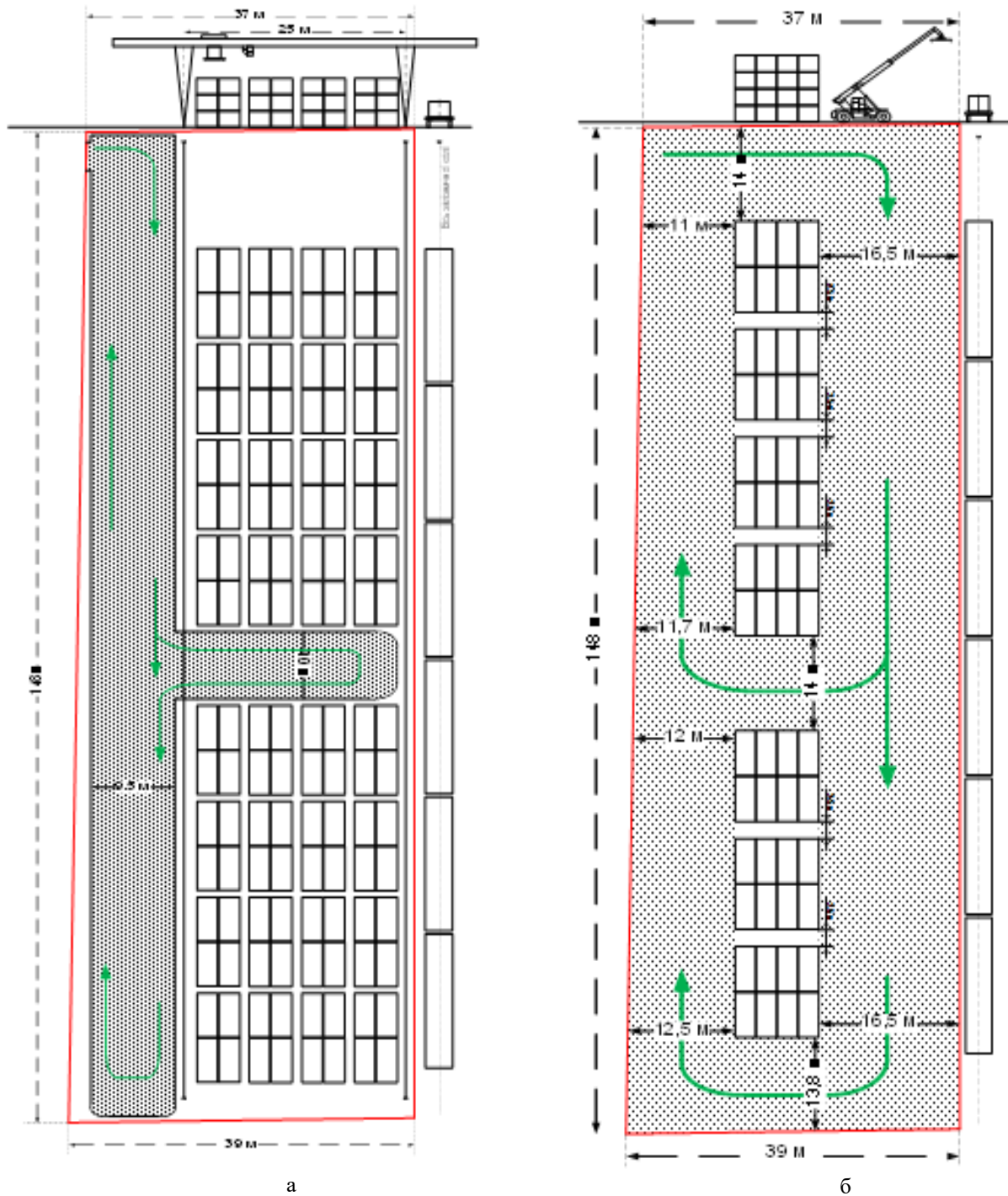


Рис. 2. Схема розміщення контейнерів на майданчику, оснащеному козловим краном (а); ричстакером (б)

Виходячи з вищенаведеного, постає необхідність у визначенні раціональної технології роботи контейнерного терміналу. Для оцінювання ефективності функціонування контейнерного терміналу використовується такий критерій:

$$R(M, T) \rightarrow \min R \quad (1)$$

при обмеженнях

$$\left. \begin{aligned} M^{\min} \leq M \leq M^{\max}; \\ T^{\min} \leq T \leq 24, \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

де  $M$  – кількість навантажувально-розвантажувальних машин (НРМ), шт.;

$T$  – час роботи вантажного фронту, год.

Вираз критерію оптимізації для переробки контейнерів ричстакером при недетермінованому надходженні транспортних засобів до контейнерного терміналу має вигляд

$$R = V_{\text{рем}}^{\text{НРМ}} + V_{\text{оч}}^{n(\epsilon)} + V_{\text{обсл}}^{\text{НРМ}} + V_{\text{оч}}^{\text{НРМ}}, \quad (3)$$

де  $V_{\text{рем}}^{\text{НРМ}}$  – експлуатаційні витрати на виконання вантажних робіт НРМ, грн;

$V_{\text{оч}}^{n(\epsilon)}$  – експлуатаційні витрати через простой автотранспорту при виконанні вантажних операцій, грн;

$V_{\text{обсл}}^{\text{НРМ}}$  – експлуатаційні витрати на утримання працівників, що обслуговують НРМ, грн;

$V_{\text{оч}}^{\text{НРМ}}$  – експлуатаційні витрати, пов'язані з очікуванням НРМ виконання вантажних операцій, обумовлені випадковим підходом автомобілів до вантажного фронту, грн.

Експлуатаційні витрати на виконання вантажних робіт НРМ

$$V_{\text{рем}}^{\text{НРМ}} = M(C_{\text{оп}} + C_n + C_{\text{ам}} + C_{\text{рем}}), \quad (4)$$

де  $C_{\text{оп}}$  – оплата праці навченого персоналу однієї НРМ, грн;

$C_n$  – вартість палива і мастильних матеріалів, що витрачається однією НРМ, грн;

$C_{\text{ам}}$  – амортизаційні відрахування на одну НРМ, грн;

$C_{\text{рем}}$  – витрати на поточний ремонт і технічне обслуговування однієї НРМ, грн.

Експлуатаційні витрати через простой автотранспорту при виконанні вантажних операцій

$$V_{\text{оч}}^{n(\epsilon)} = N_a t_{\text{ова}} C_a, \quad (5)$$

$$t_{\text{ова}} = \frac{\frac{1}{2} Q_n t_a (1 + v_a^2)}{TPM \left(1 - \frac{Q_n}{TPM}\right)}, \quad (6)$$

де  $N_a$  – кількість автомобілів, що надходять до вантажного фронту за час його роботи, шт.;

$t_{\text{ова}}$  – час очікування автотранспортом виконання вантажних операцій, год;

$C_a$  – вартість години простою автомобілю, грн;

$Q_n$  – обсяг переробки контейнерів, т;

$t_a$  – час простою автотранспорту, год;

$v_a$  – коефіцієнт варіації надходження автомобілів до вантажного фронту;

$T$  – час роботи вантажного фронту, год;

$P$  – продуктивність НРМ, т/год.

$$V_{\text{оч}}^{n(\epsilon)} = \frac{\frac{1}{2} N_a Q_n t_a (1 + v_a^2) C_a}{TPM \left(1 - \frac{Q_n}{TPM}\right)}. \quad (7)$$

Експлуатаційні витрати на утримання навченого персоналу НРМ

$$V_{\text{обсл}}^{\text{НРМ}} = \frac{Q_n M C_w}{k_o P}, \quad (8)$$

де  $C_w$  – заробітна плата навченого персоналу НРМ, грн;

$k_o$  – коефіцієнт використання робочого часу ричстакера.

Експлуатаційні витрати, пов'язані з очікуванням НРМ виконання вантажних операцій, обумовлені випадковим підходом автомобілів до вантажного фронту

$$V_{\text{оч}}^{\text{НРМ}} = M t_{\text{ов}} C_{\text{пр}}, \quad (9)$$

$$t_{\text{ов}} = \frac{\frac{1}{2} \left(1 - \frac{Q_n M P}{T}\right) t_a (1 + v_a^2) Q_n M P}{T}, \quad (10)$$

де  $t_{ow}$  – час очікування НРМ початку виконання вантажних операцій, год;  
 $C_{pr}$  – вартість години простою НРМ, грн.

Підставивши вираз (10) у вираз (9), отримаємо

$$V_{оч}^{НРМ} = \frac{\frac{1}{2} M \left( 1 - \frac{Q_n M P}{T} \right) t_a (1 + v_a^2) Q_n M P C_{pr}}{T} \quad (11)$$

Отже, цільова функція

$$R(M, T) = M(C_{on} + C_n + C_{am} + C_{pem}) + \frac{1}{2} N_a Q_n t_a (1 + v_a^2) C_a + \frac{TP M \left( 1 - \frac{Q_n}{TPM} \right)}{TPM}$$

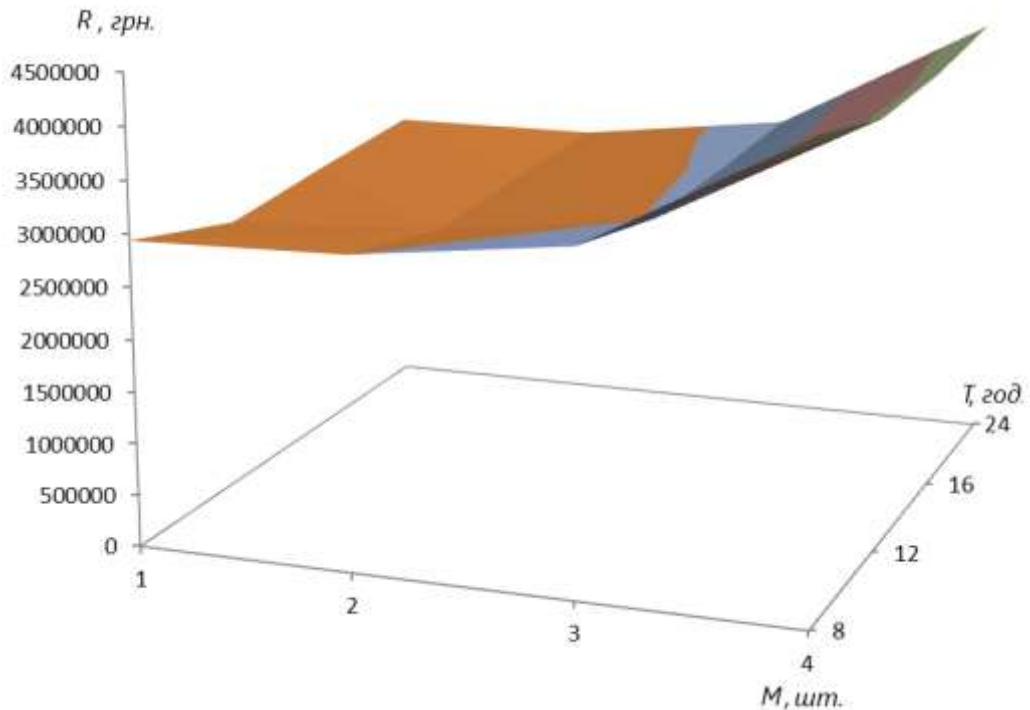


Рис. 3. Залежність експлуатаційних витрат від кількості НРМ і часу роботи вантажного фронту

Результати дослідження цільової функції свідчать про наявність мінімуму, що дає змогу визначати таку кількість ричстакерів і час роботи контейнерного терміналу, який буде відповідати раціональній технології його роботи. Мінімальні експлуатаційні витрати будуть при роботі одного ричстакера – 12 год/доба.

$$+ \frac{Q_n M C_w}{k_o P} + \frac{\frac{1}{2} M \left( 1 - \frac{Q_n M P}{T} \right) t_a (1 + v_a^2) Q_n M P C_{pr}}{T} \rightarrow \min. \quad (12)$$

Розроблена модель дає змогу знайти такі значення керованих параметрів роботи  $M$  і  $T$ , за яких функціонал (12) набуває мінімального значення, що дасть змогу зменшити експлуатаційні витрати і звільнити додаткові навантажувальні ресурси. Після моделювання роботи для вихідних умов станції Л отримано залежність експлуатаційних витрат від кількості НРМ і часу роботи вантажного фронту (рис. 3).

**Висновки.**

1. Проведено аналіз сучасних технологій переробки контейнерів за кордоном для можливості впровадження таких технологій в Україні.
2. Обрано раціональну технологію переробки контейнерів на контейнерному терміналі. Запропоновано варіант технічного оснащення контейнерного пункту за допомогою ричстакерів замість наявних кранів, що є більш ефективним і надійним для безперервної роботи, особливо в умовах воєнного часу. Крім того, ричстакер за економічними

показниками перевершує козловий кран, тому його використання буде доцільним і в мирний час.

#### Список використаних джерел

1. Деменко Володимир. Прості кроки для збільшення перевезень до ЄС. URL: <https://www.railinsider.com.ua/volodymyr-demenko-prosti-kroky-dlya-zbilshennya-perevezen-do-yes/> (дата звернення 15.11.2023).
2. Стрелко О. Г., Бердниченко Ю. А., Ковальський І. Л., Вознюк В. С. Аналіз розвитку контейнерних перевезень залізничним транспортом в Україні. *Наукові праці ВНТУ*. 2020. № 2. С. 1–6.
3. Огороков А. М. Аналіз перспектив розвитку ринку контейнерних перевезень в Україні. *Транспортні системи та технології перевезень*: збірник. наук. праць ДНУЗТ ім. акад. В. Лазаряна. Дніпро, 2015. Вип. 10. С. 98 – 104.
4. Бех П. В. Удосконалення системи контейнерних перевезень на залізницях України: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.22.20. Дніпропетровськ, 2006. 20 с.
5. Кебал Ю. В., Кондратюк С. М., Мямлін С. С. Вдосконалення конструкцій рухомого складу для перевезення контейнерів залізничним транспортом. *Збірник наукових праць ДНУЗТ ім. акад. В. Лазаряна*. Дніпро, 2018. Вип. 15. С. 33–41.
6. Контрейлерні перевезення. URL: [https://www.uz.gov.ua/cargo\\_transportation/intermodal\\_transportation/piggyback/](https://www.uz.gov.ua/cargo_transportation/intermodal_transportation/piggyback/) (дата звернення: 21.11.2023).
7. Американці створили безпілотний візок для вагонів (відео). URL: <https://glavcom.ua/techno/hitech/amerikanci-stvorili-bezpilotniy-vizok-dlya-vagoniv-video-816563.html> (дата звернення 20.11.2023).
8. HyperloopTT підготувала вантажну версію гіперзвукового поїзда (відео). URL: <https://cikavosti.com/hyperlooptt-pidhotuvala-vantazhnu-versiiu-hiperzvukovoho-poizda-video/> (дата звернення 20.11.2023).
9. Illés B., Véha A., Vida L. New ideas for inland intermodal transport. *Transport Problems*. 2020. Vol. 15. Is. 1. P. 117–130.

**Prodashchuk S., Shapatina O., Troyan D., Kvasov P., Liashko Y.**  
**Improvement of container processing technology in modern conditions.**

**Abstract.** In recent years, there has been significant growth in container transportation, which is developing at a fast pace and contributes to increasing the competitiveness of railway transport. The article deals with issues related to increasing the efficiency of the use of modern container processing technologies in Ukraine.

Today, due to the state of war, Ukraine is in difficult conditions, the infrastructure is partially occupied and under fire, which complicates the operation of all transport facilities, including container terminals. Thus, the container terminal has to work on a shortened schedule (16 hours instead of 24) in conditions of power outages,

which makes it impossible for the gantry cranes to work, and thus leads to an increase in downtime of containers at the terminals and their accumulation. Where does the problem arise to ensure the rational use of existing containers and the reduction of idle empty and unloaded containers. Thus, in order to solve this problem, it is necessary to improve the technology of work on recycling containers due to the use of more electronic technologies.

Taking this into account, modern innovative methods used in the transportation and processing of containers abroad are being researched. The effectiveness of using river stackers instead of gantry cranes when handling containers at the container terminal is substantiated in accordance with modern realities.

**Keywords:** container, reach stacker, gantry crane, railway transport.

**Продашук Світлана Миколаївна**, кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри управління вантажною і комерційною роботою, Український державний університет залізничного транспорту, Харків, Україна. E-mail: [sp7728@ukr.net](mailto:sp7728@ukr.net). ORCID ID: <http://orcid.org/0000-0002-7673-3863>.

**Шапатіна Ольга Олександрівна**, кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри управління вантажною і комерційною роботою, Український державний університет залізничного транспорту, Харків, Україна. E-mail: [uvkr@kart.edu.ua](mailto:uvkr@kart.edu.ua). ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-9185-6212>.

**Троян Денис Олександрович**, аспірант кафедри управління вантажною і комерційною роботою, Український державний університет залізничного транспорту, Харків, Україна. E-mail: [troyan@gmail.com](mailto:troyan@gmail.com).

**Квасов Павло Вікторович**, аспірант кафедри управління вантажною і комерційною роботою, Український державний університет залізничного транспорту, Харків, Україна. E-mail: [hvac.kpv@gmail.com](mailto:hvac.kpv@gmail.com).

**Ляшко Юрій Анатолійович**, магістрант кафедри управління вантажною і комерційною роботою, Український державний університет залізничного транспорту, Харків, Україна. E-mail: [Y.lyashko@ukr.net](mailto:Y.lyashko@ukr.net).

**Prodashchuk Svitlana Mykolaivna**, PhD (Tech), associate professor of department of management of freight and commercial work, Ukrainian State University of Railway Transport, Kharkiv, Ukraine. E-mail: [sp7728@ukr.net](mailto:sp7728@ukr.net). ORCID ID: <http://orcid.org/0000-0002-7673-3863>.

**Shapatina Olha Oleksandrivna**, PhD (Tech), associate professor of department of management of freight and commercial work, Ukrainian State University of Railway Transport, Kharkiv, Ukraine. E-mail: [uvkr@kart.edu.ua](mailto:uvkr@kart.edu.ua). ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-9185-6212>.

**Troyan Denis Oleksandrovich**, postgraduate student of department of management of freight and commercial work, Ukrainian State University of Railway Transport, Kharkiv, Ukraine. E-mail: [troyan@gmail.com](mailto:troyan@gmail.com).

**Kvasov Pavlo Viktorovich**, postgraduate student of department of management of freight and commercial work, Ukrainian State University of Railway Transport, Kharkiv, Ukraine. E-mail: hvac.kpv@gmail.com.

**Liashko Yurii Anatoliyovich**, graduate student of department of management of freight and commercial work, Ukrainian State University of Railway Transport, Kharkiv, Ukraine. E-mail: Y.lyashko@ukr.net.

КРАШЕНІНІН О.С., д.т.н., професор (Український державний університет залізничного транспорту)

ШАПАТІНА О.О., к.т.н., доцент (Український державний університет залізничного транспорту)

КАЛИТИНСЬКА М.О., магістр (Український державний університет залізничного транспорту)

ЛИХОЛІТ Я.В., магістр (Український державний університет залізничного транспорту)

ГАЛЮК Р.М., магістр (Український державний університет залізничного транспорту)

## Обґрунтування стратегії організації ремонту локомотивів на основі наявних ресурсів

*В умовах дефіциту ресурсів сучасного обладнання, дефіциту кваліфікованих і професійних спеціалістів, слабого розвитку сервісу виникає необхідність обґрунтування оптимальної стратегії з організації ремонту з урахуванням наявних ресурсів.*

*В статті розглянуті питання, що пов'язані з формалізацією процедури прийняття рішення з урахуванням інформації щодо реалізації можливих ресурсів.*

*На підставі окремих складових, що визначають прийнятну стратегію за спеціальними алгоритмами визначається оптимальна ефективна стратегія з організації ремонтних заходів для обладнання локомотивів.*

**Ключові слова:** функція ефективності, показник ефективності, стратегія організації ремонту.

### Постанова проблеми.

Для економіки і промисловості нашої країни, в тому числі і для залізниць в цілому, необхідно оперативно приймати конкретні рішення щодо невідкладних заходів зі створення умов виживання і потенційного розвитку, тобто формувати стратегію проведення технічного обслуговування (ТО), поточного ремонту (ПР) з урахуванням наявних ресурсів ремонтного господарства, рівня запасів паливо-мастильних матеріалів і інших матеріальних запасів і наявного виробничого контингенту.

Причини такого становища склалися не одразу, але їх вирішення йшло або повільними темпами або відкладалися на невизначений термін. Це стосується як оновлення локомотивного парку, так і іншої залізничної інфраструктури. Особливо це стосувалося локомотивного господарства і його ремонтного господарства. Ступінь механізації і автоматизації ремонтної галузі не перевищує 25%, що пов'язано як зі складністю запровадження стійкої і стабільної технології обслуговування та ремонту обладнання локомотивів через різний їх віковий і технічний стан, так і нехтування або повільних темпів запровадження сучасного діагностичного і ремонтного обладнання [1-3]. На фоні цього і за умови наявних обставин чи не останнім чинником забезпечення ефективності ремонту залишається зважена політика (стратегія) в сфері управління

В практичному аспекті цікаві дослідження стосуються запровадження сервісу і обґрунтування

наявними ресурсами для конкретних умов експлуатації.

Це визначає актуальність задачі оперативного вибору з організації ТО, ПР, як вітчизняного, так і закордонного тягового рухомого складу (ТРС) в умовах сучасних реалій.

### Аналіз останніх досліджень і публікацій.

Регулювання всією діяльністю залізничної галузі підпорядковане наказам і розпорядженням як на рівні держави, так і на рівні галузі. В них формулювалися проблеми залізничного транспорту і шляхи виходу з погіршеної ситуації на залізницях [1, 4, 5].

Значний вклад в реалізацію поставлених задач перед галуззю внесли вітчизняні вчені, які в своїх дослідженнях розглядали фундаментальні проблеми і прикладні задачі щодо розвитку залізничного транспорту.

Так за останні роки з'явилося багато публікацій, в яких розглядаються питання щодо врахування принципів і витрат на життєвий цикл у систему ТО і ПР локомотивів [2, 3, 6].

При цьому підкреслюється необхідність комплексного підходу щодо системи утримання ТРС, починаючи з проектування і виготовлення, витрат на експлуатацію, організацію ТО, ПР до утилізації окремого обладнання локомотивів [2].

В зв'язку з обмеженими можливостями реалізувати програму оновлення ТРС значний інтерес представляють дослідження теоретичного дислокації сервісних центрів на полігоні залізниць [2, 10, 11].

Однак важливими залишаються задачі щодо оперативного управління ресурсами при можливих альтернативах їх сполучення, що і визначає актуальність задач, що розглядаються в статті.

**Мета та завдання дослідження.**

Мета статті полягає в обґрунтуванні стратегії організації ремонту локомотивів з урахуванням наявних ресурсів окремих чинників, які є у підприємства з утримання локомотивів.

З урахуванням цього сформульовані наступні задачі для виконання постановленої задачі:

1. Вибрати показники, що характеризують ефективність відповідної стратегії ремонтних заходів.
2. Визначити оптимальну стратегію організації ремонтних заходів при різній кількості чинників, що характеризують її ефективність.
3. Формалізувати пошук оптимального плану виконання ремонтних заходів за спеціальним алгоритмом.

**Виклад основного матеріалу.**

На залізницях України експлуатується як вітчизняний, так і закордонний ТРС.

Прийнята планово-попереджувальна система ремонту, яка довгий час була домінуючою для вітчизняного ТРС, вже майже вичерпала свої ресурси і практично не дозволяє підтримувати високий рівень ефективності закордонного ТРС як по обсягу, та і по глибині оцінки його технічного стану. Спроба забезпечити підтримку технічного стану власними силами важко реалізується, хоча і є досить цікаві наробки і технології. Але в цілому на практиці ще досі не проведені ремонти великого обсягу, що робить доцільним запровадження адаптивної системи ремонту, базуючись на окремих чинниках, що визначають ефективність ремонтних заходів.

З урахуванням цього розглянемо задачу вибору і порівняння планів з прийняття стратегії організації ТО, ПР, зокрема, для закордонного рухомого складу, що експлуатується в нашій країні (загалом це стосується і іншого рухомого складу в сучасних реаліях). Оскільки організація виробництва передбачає поєднання у часі і просторі особистих і речових елементів виробництва, а саме людей, знаряддя і предметів праці, в якості показників ефективності кожного плану оберемо наступні:

$W_1$  – імовірність своєчасного і якісного проведення ТО, ПР локомотивам (рівень організації праці і можливості її реалізації),  $W_1 = 0,5-1,0$ ;

$W_2$  – кількість задіяного обладнання для проведення ТО, ПР локомотивів (наявність ремонтного обладнання, оснащення, приладів контролю і діагностування окремих систем і агрегатів локомотива),  $W_2 = 1-20$ ;

$W_3$  – обсяг додаткових резервів для проведення ТО, ПР локомотивів (можливість залучення додаткового обладнання і ремонтного персоналу),  $W_3 = 0-10$ .

Сформуємо плани  $u_1, u_2, u_3, u_4, u_5$ , що характеризуються наступними показниками

$$x(u_1) = (0,92;15;1)^T;$$

$$x(u_2) = (0,92;8;6)^T;$$

$$x(u_3) = (0,8;4;1)^T;$$

$$x(u_4) = (0,915;5;1)^T;$$

$$x(u_5) = (0,915;6;0)^T.$$

Плани характеризують співвідношення значень  $W_1, W_2, W_3$ . В такій постановці необхідно обрати план, який кращий за інші. Для рішення такої задачі з дискретною кінцевою множиною стратегій використовуємо метод [12]

$$u^* : \max_{u \in U} \sum_{i=1}^m \gamma_i W_i(u); \quad (1)$$

де  $\gamma_i$  – будь-яке позитивне число;

$$\gamma_i = \frac{1}{\delta_i} \sum_{j=i+1}^m \gamma_j \Delta_j, \quad i = m-1, m-2, \dots, 2, 1 \quad (2)$$

$\delta_i$  – нижня оцінка максимально можливого приросту значення  $i$ -го показника, що визначається за умови:

$$0 < \delta_i \leq \min \{W_i(u) - W_i(v)\}, \quad u, v \in U, \quad W_i(u) \neq W_i(v); \quad (3)$$

$\Delta_i$  – верхня оцінка максимально можливого приросту значення  $i$ -го показника, що визначається за умови:

$$\Delta_i = \max_{u \in U} W_i(u) - \min_{u \in U} W_i(u); \quad (4)$$

Визначимо значення коефіцієнтів  $\gamma_i, i = \overline{1,3}$  і  $u^*$ . Враховуючи, що показники  $W_2$  і  $W_3$  доцільно мінімізувати, проведемо їх еквівалентне перетворення:

$$\tilde{W}_2 = -W_2; \quad \tilde{W}_3 = -W_3.$$

Обираємо  $\gamma_2 = 1$ , оскільки показник  $W_2$  в ранговому ряду поставлено останнім (головним з двох останніх планів є мінімальні витрати).

Визначимо  $\delta_1$ :

$$0 < \delta_1 \leq \min\{[0,92-0,8], [0,92-0,915], [0,915-0,8]\} = 0,05, \text{ прийmemo } \delta_1=0,01.$$

Аналогічно визначимо  $\delta_2$ :

$$0 < \delta_2 \leq \min\{[-15+8], [-15+4], [-15+5], [-15+6], [-8+4], [-8+5], [-8+6], [-4+5],$$

$[-4+6], [-5+6]\} = 1, \text{ прийmemo } \delta_2=1.$

Визначимо  $\delta_3$ :

$$0 < \delta_3 \leq \min\{[-1+6], [-1+0], [-6+0]\} = 1, \text{ прийmemo } \delta_3=1.$$

Визначаємо  $\Delta_i$ :

$$\text{Так } \Delta_1 \geq \max[0,92;0,8;0,915] - \min[0,92;0,8;0,915] = 0,92 - 0,8 = 0,12;$$

приймемо  $\Delta_1=0,2$ .

$$\Delta_2 \geq \max[-15;-8;-4;-5;-6] - \min[-15;-8;-4;-5;-6] = -4 + 15 = 11;$$

приймемо  $\Delta_2=20$ .

$$\Delta_3 \geq \max[-1;-6;0] - \min[-1;-6;0] = 0 + 6 = 6; \text{ прийmemo } \Delta_3=10.$$

Оскільки наведена методика відноситься до числових значень, що принципово не впливає на задач, пов'язаних з прийняттям рішень, що підсумкові результати. Рекомендуються експертами, прийняті значення  $\delta_i$ ,  $\Delta_i$  не завжди відповідають правилам округлення

Визначаємо:

$$\gamma_3 > \frac{1}{\delta_3} \cdot (\gamma_2 \cdot \Delta_2) = \frac{1}{1} \cdot 1 \cdot 20 = 20, \text{ прийmemo } \gamma_3=25.$$

$$\gamma_1 = \frac{1}{\delta_1} \cdot (\gamma_2 \cdot \Delta_2 + \gamma_3 \cdot \Delta_3) = \frac{1}{0,01} \cdot (1 \cdot 20 + 25 \cdot 10) = 27 \cdot 10^3, \text{ прийmemo } \gamma_3=3 \cdot 10^4.$$

Після цього визначаємо значення цільової функції  $\varphi(u_j) = \sum_{i=1}^3 \gamma_i W_i(u_j)$ ,  $j = \overline{1,5}$ .

$$\varphi(u_1) = 3 \cdot 10^4 \cdot 0,92 + 1 \cdot (-15) + 25 \cdot (-1) = 27560;$$

$$\varphi(u_2) = 3 \cdot 10^4 \cdot 0,92 + 1 \cdot (-8) + 25 \cdot (-6) = 27442;$$

$$\varphi(u_3) = 3 \cdot 10^4 \cdot 0,8 + 1 \cdot (-4) + 25 \cdot 0 = 23996;$$

$$\varphi(u_4) = 3 \cdot 10^4 \cdot 0,915 + 1 \cdot (-5) + 25 \cdot (-1) = 27420;$$

$$\varphi(u_5) = 3 \cdot 10^4 \cdot 0,915 + 1 \cdot (-6) + 25 \cdot 0 = 27444.$$

Таким чином,  $\max_{u_j \in U} \varphi(u_j) = 27560$  і  $u^* = u_1$ .

Тобто при забезпеченні рівня організації праці в розмірі 0,92, наявності ремонтного обладнання, оснащення, приладів контролю і діагностування окремих систем і агрегатів локомотива в розмірі 15 одиниць, можливості залучення додаткового обладнання і ремонтного персоналу, в розмірі одиниці

ефективність реалізації стратегії ТО, ПР локомотивів найвища.

При числі компонент векторного показника ефективності більше п'яти зручно вирішувати задачу таким чином

$$u^* : \min \sum_{i=1}^m (\bar{\Delta} - W_i(u_j))^p, \quad (5)$$

$$\bar{\Delta} \geq \max_{u \in U} \max_{i \in j} W_i(u); \quad (6)$$

$$p \geq \frac{\ln m}{\ln \bar{\Delta} - \ln(\bar{\Delta} - \delta)}. \quad (7)$$

У випадку, коли  $\bar{\Delta} = \delta$ , то  $p$  невизначено і величину  $p > 0$  можна приймати будь-якою, але зручніше  $p = 1$ .

Проілюструємо реалізацію такої ситуації, додавши план  $u_6$ , що характеризується параметрами

$x(u_6) = (0,91;7;2)$  і додамо план  $W_4$  (кількість

спеціалістів-ремонтників для виконання ТО, ПР) на рівні (10,5,3,3,4,5).

Тоді отримаємо плани проведення ремонту  $u_1, u_2, u_3, u_4, u_5, u_6$ , що будуть характеризуватися наступними показниками

$$x(u_1) = (0,92;15;1;10);$$

$$x(u_2) = (0,92;8;6;5);$$

$$x(u_3) = (0,8;4;1;3);$$

$$x(u_4) = (0,915;5;1;3);$$

$$x(u_5) = (0,915;6;0;4);$$

$$x(u_6) = (0,91;7;2;5).$$

Розрахуємо значення  $\bar{\Delta}$

$$\bar{\Delta} \geq \max_{u \in U} \max_{i \in j} W_i(u) = \max(15,8,4,5,6,7) = 15.$$

Прийmemo  $\bar{\Delta} = 20$ .

Визначаємо значення  $\delta$  за формулою

$$\delta < \min \{W_i(u) - W_i(u)\}$$

$$0 < \delta \leq \min \{-15+8, [-15+4], [-15+5], [-15+6], [-15+7], [-8+4], [-8+5], [-8+6],$$

$$[-8+7], [-4+5], [-4+6], [-4+7], [-5+6], [-5+7]\} = 1, \text{ прийmemo } \delta=0,1.$$

Визначаємо  $p$

$$p \geq \frac{\ln 4}{\ln 20 - \ln(20 - 0,1)} = \frac{1,39}{3,00538 - 3,00035} = \frac{1,39}{0,005} = 278.$$

Визначаємо параметри задачі

$$\Delta \geq \bar{\Delta} - \min_{u \in U} \min_{i \in j} W_i(4) = 20 - \min(1, 1, 5, 3, 3, 4, 5) = 17.$$

Приймаємо  $\Delta = 17$ .

$$\gamma_4 = 1, \quad \gamma_3 = \frac{17}{0,1} \cdot (\gamma_2 \cdot \Delta_2) = \frac{17}{0,1} \cdot 1 \cdot 1 = 170, \quad \text{приймаємо } \gamma_3 = 200,$$

$$\gamma_2 > \frac{17}{0,1} \cdot (1 + 200) = 34170, \quad \text{приймаємо } \gamma_2 = 3,5 \cdot 10^4,$$

$$\gamma_1 = \frac{17}{0,1} \cdot (1 + 200 + 3,5 \cdot 10^4) = 5,94 \cdot 10^6, \quad \text{приймаємо } \gamma_1 = 6 \cdot 10^6.$$

В даному випадку розрахуємо значення  $\varphi(u_i)$  за формулою (1)

$$\varphi(u_1) = 6 \cdot 10^6 \cdot 0,92 + 3,5 \cdot 10^4 \cdot (-15) + 170 \cdot (-1) + 1 \cdot (-10) = 4,99 \cdot 10^6;$$

$$\varphi(u_2) = 6 \cdot 10^6 \cdot 0,92 + 3,5 \cdot 10^4 \cdot (-8) + 170 \cdot (-6) + 1 \cdot (-5) = 5,23 \cdot 10^6;$$

$$\varphi(u_3) = 6 \cdot 10^6 \cdot 0,8 + 3,5 \cdot 10^4 \cdot (-4) + 170 \cdot 0 + 1 \cdot (-3) = 4,66 \cdot 10^6;$$

$$\varphi(u_4) = 6 \cdot 10^6 \cdot 0,915 + 3,5 \cdot 10^4 \cdot (-5) + 170 \cdot (-1) + 1 \cdot (-3) = 5,31 \cdot 10^6;$$

$$\varphi(u_5) = 6 \cdot 10^6 \cdot 0,915 + 3,5 \cdot 10^4 \cdot (-6) + 170 \cdot 0 + 1 \cdot (-4) = 5,27 \cdot 10^6;$$

$$\varphi(u_6) = 6 \cdot 10^6 \cdot 0,91 + 3,5 \cdot 10^4 \cdot (-7) + 170 \cdot (-2) + 1 \cdot (-5) = 5,21 \cdot 10^6.$$

Як видно з наведених розрахунків, при додаванні планів і показників ефективності оптимальною стратегією буде стратегія  $u^* = u_4$ , для якої  $\max_{u \in U} \varphi(u_j) = 5,31 \cdot 10^6$ . Тобто залучення до реалізації стратегії ТО, ПР локомотивів спеціалістів-

ремонтників високої кваліфікації передбачає вибір іншої стратегії.

Але проведемо розрахунки вибору оптимального плану організації стратегії ТО, ПР локомотивів згідно з формулою (5).

При цьому приймемо значення  $p = 1$ .

Тоді значення  $u_i$

$$u_1 : \min[(17 - 0,92) + (17 - 15) + (17 - 1) + (17 - 10)] = 41,08;$$

$$u_2 : \min[(17 - 0,92) + (17 - 8) + (17 - 6) + (17 - 5)] = 48,08;$$

$$u_3 : \min[(17 - 0,8) + (17 - 4) + (17 - 0) + (17 - 3)] = 60,2;$$

$$u_4 : \min[(17 - 0,915) + (17 - 5) + (17 - 1) + (17 - 3)] = 58,085;$$

$$u_5 : \min[(17 - 0,915) + (17 - 6) + (17 - 0) + (17 - 4)] = 57,085;$$

$$u_6 : \min[(17-0,91) + (17-7) + (17-2) + (17-5)] = 53,09.$$

З наведених розрахунків  $u^* = \min \sum_{i=1}^m (\Delta - W_i(u))$  приймає мінімальне значення для плану

$$u^* = u_1 = 41,08.$$

Порівнюючи ці розрахунки з розрахунками, що проведені за формулами (1) – (4), можна констатувати, що остаточне рішення слід примати при співпадінні двох методик, згідно алгоритму (рис.1).

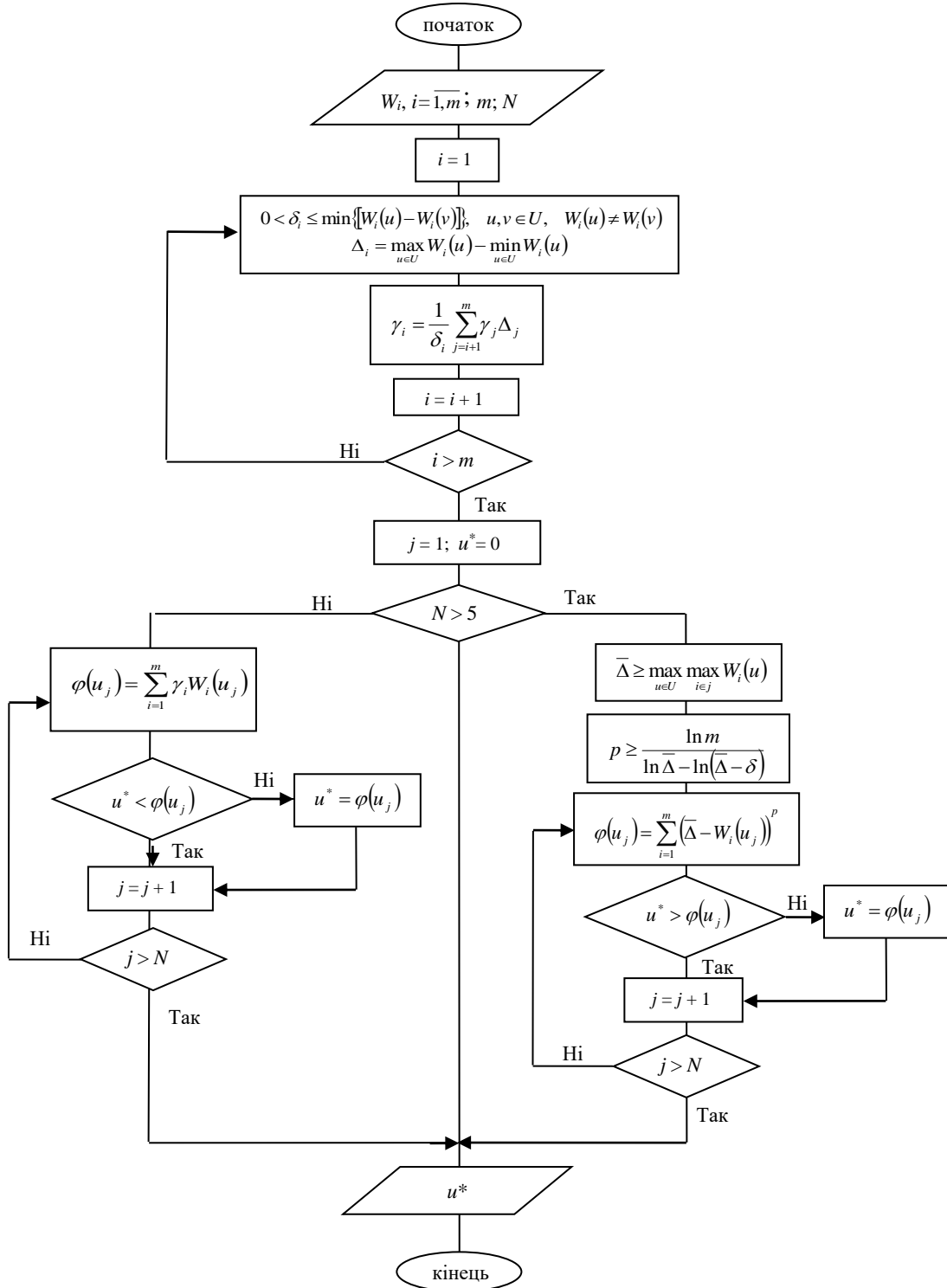


Рис. 1 Структурна схема вибору оптимального плану стратегії організації ремонтних заходів при проведенні ТО, ПР локомотивів

**Висновки.**

1. Визначені чинники показників ефективності для обраної стратегії організації ремонтних заходів, а саме: імовірність своєчасного і якісного проведення ТО, ПР локомотива (рівень організації праці і можливості її реалізації), кількість необхідного обладнання для проведення ТО, ПР локомотивів (наявність ремонтного обладнання, оснащення, приладів контролю і діагностування окремих систем і агрегатів локомотива), обсяг додаткових резервів для проведення ТО, ПР локомотивів (можливість залучення додаткового обладнання і ремонтного персоналу).
2. Проведені процедури пошуку організації оптимального плану стратегії організації ТО, ПР локомотивів при кількості показників ефективності  $m=3$  в умовах обмеженості ресурсів і потужностей депо, а саме план  $u^*=u_1$  при значенні  $W_1=0,92$ ;  $W_2=15$ ;  $W_3=1$ .
3. Виконані розрахунки для оцінки організації оптимального плану проведення ремонтних заходів при кількості показників ефективності  $m>4$ , показали, що остаточний вибір стратегії організації ТО, ПР локомотивів слід приймати при співпадінні двох методик, що приводяться у статті. Розширення діапазону чинників показників ефективності дозволяє маневрувати наявними ресурсами для обрання оптимальної стратегії ТО, ПР локомотивів.
4. Розроблений алгоритм вибору оптимального плану стратегії організації ремонтних заходів при проведенні ТО, ПР локомотивів дозволяє проводити перевірки з остаточного прийняття рішення щодо вибору стратегії ТО, ПР локомотивів.

**Список використаних джерел**

1. Державна цільова програма реформування залізничного транспорту на 2010-2019 роки (затверджена Постановою КМУ в 16.12.2000 №1390 із змінами від 26.10.2011 року №1106). URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1390-2009-%D0%BF#Text> (дата звернення: 23.11.2023).
2. Тартаковський Е.Д., Уманець М.Г., Аулін Д.О. Визначення життєвого циклу тягового рухомого складу (ТРС). *Збірник наукових праць УкрДАЗТ*, 2006. №72. С. 82-86.
3. Крашенінін О.С., Фалендиш А.П. Оцінка життєвого циклу локомотивів. *Збірник наукових праць УкрДАЗТ*, 2001. Вип.46. С. 55-58.
4. Закон України «Про залізничний транспорт України» від 06.09.2019 за № 1196-1. URL: [https://w1.c1.rada.gov.ua/pls/zweb2/webproc4\\_1?pf3511=66737](https://w1.c1.rada.gov.ua/pls/zweb2/webproc4_1?pf3511=66737) (дата звернення: 23.11.2023).
5. Комплексна програма оновлення залізничного рухомого складу України на 2008-2020 роки (затверджена наказом МТЗУ від 14.10.2008 №1259). К.: ДНДЦ Укрзалізниці, 2009. 299 с.
6. Понтичелли К. Стоимость жизненного цикла железнодорожного подвижного состава: от теории к практике. *Техника железных дорог*, 2009. №4. 74 с.
7. Integrated Optimization of Rolling Stock Scheduling and Flexible Train Formation Based on Passenger Demand for an Intercity High-Speed Railway / Peng Zhao, Yawei Li, Baoming Han, Ruixia Yang, Zhiping Liu. *Sustainability*, MDPI, 2022. Vol. 14(9), P. 1-22. URL: <https://www.mdpi.com/2071-1050/14/9/5650> (дата звернення: 23.11.2023).
8. Калабухін Ю.Є., Тартаковський Е.Д. Теоретичні положення оновлення тягового рухомого складу з урахуванням життєвого циклу. *Збірник наукових праць УкрДАЗТ*, 2009. Вип. 111. С. 106-120.
9. Калабухін Ю.Є., Фалендиш А.П. Визначення економії експлуатаційних витрат маневрових тепловозів. *Збірник наукових праць УкрДАЗТ*, 2003. Вип. 54. С. 127-132.
10. Bismark R.D.K. Agbelie, Samuel Labi, Kumares C. Sinha. Estimating the marginal costs of bridge damage due to overweight vehicles using a modified equivalent-vehicle methodology and in-service data on life-cycle costs and usage. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 2017. Vol. 95. P. 275-288.
11. Gurov S.V., Utkin L.V. Reliability and optimization of systems with periodic modifications in the probability and possibility contexts, *Microelectron. Reliab*, 1997. Vol. 37, No. 5. P. 801-808.
12. Калабухін Ю. Є. Методологія та результати оцінки техніко-економічних показників використання сучасних маневрових тепловозів для роботи на маневровій горці. *Зб. наукових праць. Х.: УкрДАЗТ*, 2009. Вип. 110. С. 19-30.

**Krashenin O.S., Shapatina O.O., Kalitinska M.O., Lihole Y.V., Galuk R.M. Justification of locomotive repair organization strategy based on available resources.**

*Abstract. For the economy and industry of our country, including the railways as a whole, it is necessary to quickly make specific decisions regarding urgent measures to create conditions for survival and potential development.*

*The reasons for this situation did not develop immediately, but their solution was either slow or postponed indefinitely. This applies both to the renewal of the locomotive fleet and to other railway infrastructure. This was especially true of the locomotive industry and its repair industry.*

*The degree of mechanization and automation of the repair industry does not exceed 25%, which is connected both with the difficulty of introducing stable and stable technology for the maintenance and repair of locomotive equipment due to their different age and technical condition, and with the neglect or slow pace of introduction of modern diagnostic and repair equipment. Against this background and under the conditions of the existing circumstances, a balanced policy in the field of management of available resources for specific operating conditions remains almost the last factor in ensuring the efficiency of repairs*

*This determines the urgency of the task of operational selection and implementation of the plan for the organization of maintenance, current repair, both domestic and foreign traction rolling stock in the conditions of modern realities.*

*So in the conditions of shortage of resources of modern equipment, shortage of qualified and professional specialists, weak development of the service, there is a need to substantiate the optimal measures for the organization of repairs, taking into account the available resources.*

*The article discusses issues related to the formalization of the decision-making procedure taking into account information on the implementation of possible resources.*

*On the basis of individual components that determine the adopted strategy, the optimal effective strategy for organizing repair activities for locomotive equipment is determined using special algorithms.*

**Key words:** *efficiency function, performance indicator, repair organization strategy.*

**Крашенінін Олександр Семенович**, д-р техн. наук, професор кафедри експлуатація та ремонт рухомого складу, Українського державного університету залізничного транспорту. ORCID ID: 0000-0001-7462-3372. Тел.: +38 (097) 9917099. E-mail: krashenin@kart.edu.ua

**Шапатіна Ольга Олександрівна**, канд. техн. наук, доцент кафедри управління вантажною і комерційною роботою, Українського державного університету залізничного транспорту. ORCID ID: 0000-0002-9185-6212. Тел.: +38 (066) 8124889. E-mail: shapatina.uvkr@kart.edu.ua

**Калитинська Марина Олексіївна**, магістрант кафедри експлуатація та ремонт рухомого складу, Українського державного університету залізничного транспорту. Тел.: +38 (095) 6859752. E-mail: kalitinska79@gmail.com

**Лихоліт Ярослав Володимирович**, магістрант кафедри експлуатація та ремонт рухомого складу, Українського державного університету залізничного транспорту. Тел.: +38 (095) 9105825. E-mail: liholet2705@gmail.com

**Галук Руслан Михайлович**, магістрант кафедри експлуатація та ремонт рухомого складу, Українського державного університету залізничного транспорту. Тел.: +38 (098) 9676160. E-mail: klinovograd@gmail.com

**Krashenin Oлександр Semenovich**, Doctor of Technical Sciences, Professor, Department of Operation and Repair of Rolling Stock, Ukrainian State University of Railway Transport. ORCID ID: 0000-0001-7462-3372. Tel.: +38 (097) 9917099. E-mail: krashenin@kart.edu.ua

**Shapatina Olga Oleksandrivna**, PhD (Tech), associate professor of department of management of freight and commercial work, Ukraine state university of railway transport. Tel.: ORCID ID: 0000-0002-9185-6212. Tel.: +38 (066) 8124889. E-mail: shapatina.uvkr@kart.edu.ua

**Kalitinska Maryna Oleksiivna**, master of Department of Operation and Repair of Rolling Stock, Ukrainian State

University of Railway Transport. Tel.: +38 (095) 6859752. E-mail: kalitinska79@gmail.com

**Liholek Yaroslav Volodymyrovych**, master of Department of Operation and Repair of Rolling Stock, Ukrainian State University of Railway Transport. Tel.: +38 (095) 9105825. E-mail: liholet2705@gmail.com

**Galuk Ruslan Mykhailovych**, master of Department of Operation and Repair of Rolling Stock, Ukrainian State University of Railway Transport. Tel.: +38 (098) 9676160. E-mail: klinovograd@gmail.com

УДК 629.4

DOI: 10.18664/iksz.v28i4.296406

ПУЗИР В.Г., канд. техн. наук (Український державний університет залізничного транспорту)

ОБОЗНИЙ О.М., канд. техн. наук (Український державний університет залізничного транспорту)

ЗАЛАТА А.С., аспірант (Український державний університет залізничного транспорту)

## Вплив системи охолодження на енергетичні показники тягового генератора

***Анотація.** У статті розглядаються основні варіанти реалізації систем охолодження для тягових електричних машин, зокрема примусова повітряна вентиляція, самовентиляція через вбудований вентилятор, примусове рідинне охолодження як сучасний тренд. В статті аналізується вибір системи охолодження в залежності від потужності локомотиву та наводяться приклади моделей, які використовують різні методи. Висвітлюються переваги самовентиляції, зокрема, економічність і простота системи.*

***Ключові слова:** тепловоз, тяговий генератор, система охолодження, самовентиляція.*

### Вступ.

В сучасному світі залізничний транспорт відіграє надзвичайно важливу роль у забезпеченні транспортної доступності та господарського розвитку. Тепловози, як ключові елементи залізничного парку, забезпечують надійну та ефективну реалізацію тяги для вантажних та пасажирських поїздів.

Тягові генератори є джерелами електричної потужності для забезпечення руху поїзду та живлення бортових систем. Забезпечення нормальної експлуатації тягових генераторів вимагає ефективної системи їх охолодження, оскільки температурні режими можуть впливати на продуктивність і тривалість служби. Особливо важливо забезпечити стабільну роботу тягових генераторів у екстремальних умовах, таких як високі навантаження або перепади температури.

### Аналіз останніх досліджень і публікацій.

Питання ефективної експлуатації та ремонту тягових електричних машин, у тому числі і тягових генераторів розглядалося у [1]. В даній роботі основна увага приділялася розробці алгоритму для ідентифікації блока тягової електричної машини локомотива за допомогою роботизовано засобу.

Дослідження [2] враховує зміни в системі обслуговування локомотивів в Україні, включаючи реформи в роботі ремонтних підприємств та формування кластерів для обслуговування конкретних типів локомотивів, зокрема і тягових генераторів.

Основна мета – розробка віртуальної системи обслуговування та ремонту, що враховує тип локомотиву, стан ремонтних депо та оцінку рівня організації та технічного рівня ремонтного підприємства.

У [3] подано методики розрахунків основних параметрів системи охолодження тягових електричних машин. Розглянуто визначення інтенсивності виділення тепла при роботі тягового генератора та витрати повітря на його охолодження.

### Визначення мети та завдання дослідження.

Мета статті полягає в дослідженні, аналізі та порівняльному вивченні різних варіантів реалізації систем охолодження для тягових генераторів з використанням відомих наукових та інженерних підходів. Поєднуючи теоретичний аналіз з результатами експериментальних досліджень, встановлюється оптимальність кожного способу охолодження з точки зору теплових показників, ефективності та економічної доцільності.

Для досягнення мети необхідно дослідити різні варіанти систем охолодження, включаючи примусову повітряну вентиляцію, самовентиляцію та примусове рідинне охолодження та визначити переваги і недоліки кожної з них.

#### **Основна частина дослідження.**

Існує декілька основних видів реалізації систем охолодження тягових електричних машин:

- примусова повітряна вентиляція від сторонніх вентиляторів;
- самовентиляція від вбудованого на валу вентилятора;
- примусове рідинне охолодження як найбільш сучасний тренд для високо навантажених тягових електричних машин.

Найчастіше для забезпечення необхідного теплового стану в основних режимах роботи тягових електричних машин застосовують системи повітряного охолодження. При цьому вибір типу повітряної системи охолодження залежить від потужності локомотиву.

Переважає більшість локомотивного парку маневрових тепловозів та дизель-поїздів з електропередачею потужністю до 1500 к.с., що експлуатуються на промислових та залізничних підприємствах, укомплектовані дизель-генераторними установками, в яких тяговий генератор або ж агрегат обладнано вбудованим вентилятором для охолодження (тепловози ТЕМ2, ЧМЕЗ, ТЕМ103, дизель-поїзд ДЕЛ-02 та ін.). Крім того, останнім часом під час модернізації маневрові тепловози з гідропередачею переводять на електропередачу (проекти модернізації ТГМ4 та ТГМ6).

Серед переваг самовентиляції для тягових електричних машин можна зазначити:

- відносну економічність через відсутність витрат енергії на привід вентиляторів для охолодження;
- відносну простоту такої системи вентиляції та економію вільного простору в розташуванні обладнання локомотиву.

Серед недоліків систем самовентиляції можна виділити наступне:

- вентилятор являє собою додатковий вузол для діагностування контролю та обслуговування під час експлуатування;
- механічний вентилятор створює додатковий шум та може стати причиною небалансу ротора електричної машини або підвищеного рівня вібрації;

- регулювання охолоджуючого повітря (потужності вентилятора) відбувається лише за рахунок зміни частоти обертання дизель-генераторної установки в конкретному діапазоні. При цьому неможливо іншими шляхами додатково зменшити або підвищити витрату охолоджуючого повітря в залежності від теплового стану електричної машини та температури навколишнього середовища;

- в залежності від конструктивного виконання отворів, решіток, каналів для забору повітря (як ззовні, так і з кузова тепловозу) можливе потрапляння всередину електричної машини вологи, бруду та пилу, що також може мати негативні наслідки і впливати на строк служби електричної машини. Це може призвести до підвищення витрат на обслуговування та обумовлює необхідність встановлення фільтрів для очищення повітря, яке потрапляє в середину тягового генератора;

- зниження ККД електричної машини за рахунок збільшення загальних механічних витрат.

Враховуючи всі аспекти, для модернізації маневрового тепловозу ТЕМ2, яку проведено ТОВ «Полтавський тепловозоремонтний завод», було обрано тяговий агрегат змінного струму А735 У2 з самовентиляцією (рис. 1). Оскільки цей агрегат було розроблено для маневрового тепловозу ТЕМ28, то підприємство-виробник вже мало позитивні результати виготовлення та використання даного типу електричної машини у конструкції локомотиву.

Конструктивно агрегат включає наступні основні вузли: тяговий та допоміжний генератори, а також вентилятор охолодження, безпосередньо встановлений на валу. Під час роботи дизель-генераторної установки вентилятор, обертаючись, затягує повітря через решітку в підшипниковому щиті (з боку, протилежного вентилятору), створюючи всередині машини аеродинамічний тиск, під дією якого повітря проходить через внутрішню порожнину машини.

Допоміжний генератор забезпечує живлення власних потреб тепловозу, а також збудження тягового генератора в усьому діапазоні частоти обертання валу дизеля від режиму холостого ходу (700 об/хв) до номінальної робочої частоти обертання (1800 об/хв). При цьому регулювання потоку охолоджуючого повітря вентилятора, як було сказано вище, відбувається лише за рахунок зміни обертів дизель-генератора.



(а)



(б)

Рис. 1. Тяговий агрегат А735 У2 з дизелем Cummins QST-30 (а) та його 3D модель (б)

На нульовій позиції контролера машиніста ПК№0 (при частоті обертання 700 об/хв) працює виключно допоміжний генератор агрегату (тяговий генератор в цьому режимі не працює). Тривала потужність допоміжного генератора складає 55 кВт, при цьому вентилятор забезпечує достатнє охолодження. Під час випробувань на підприємстві-виробнику фактичні перевищення обмоток генератора в такому режимі склали:

- 30°C для обмотки статора;
- 80°C для обмотки збудження.

Така ж ситуація при роботі агрегату на першій позиції контролера машиніста ПК№1 (при тій самій частоті обертання 700 об/хв) та роботі вже двох генераторів. Оскільки потужність тягового генератора фактично складає 50 кВт, то штатний вентилятор також забезпечує достатнє охолодження всього агрегату.

Крім того, при роботі агрегату з номінальними заявленими параметрами тягового та допоміжного генератора в режимі при частоті обертання 1800 об/хв (ПК№8) перевищення температур обмоток, отримані дослідним шляхом, не перевищували максимально допустимих значень та становили:

- для тягового генератора: приблизно 135°C для обмотки статора та 120°C для обмотки ротора (для найбільш напруженого режиму);
- для допоміжного генератора: приблизно 50°C для обмотки статора та 80°C для обмотки ротора (для найбільш напруженого режиму);

Таким чином, агрегат має запас по нагріванню та строку служби ізоляції.

Однак постає питання впливу такої системи охолодження на енергетичні показники тягового агрегату, особливо для частот обертання нижче номінальної робочої. Слід зазначити, що загальні механічні втрати агрегату разом з вентилятором при частоті обертання дизель-генератора 1800 об/хв складають приблизно 16 кВт, що досить істотно впливає на фактичне значення коефіцієнта корисної дії (до 11%). При частоті обертання 700 об/хв механічні втрати агрегату становлять приблизно 2 кВт.

Виходячи з вищесказаного, актуальним є рішення можливості покращення енергетичних характеристик агрегату.

Одним з можливих варіантів вирішення цього питання є використання незалежної системи повітряного охолодження (мотор-вентилятор, що включає в себе робоче колесо та привідний електродвигун). До переваг такого рішення можна віднести:

- підтримання оптимального рівня температурного стану агрегату незалежно від частоти обертання дизель-генератора та атмосферних умов в усьому діапазоні навантаження дизель-генераторної установки.

- можливість включення системи охолодження при певній температурі обмоток агрегату в залежності від їхнього фактичного навантаження;

- можливість підвищити тривалу потужність допоміжного генератора на нижніх позиціях контролера машиніста мінімум на 15%. При цьому слід враховувати, що допоміжний генератор також має граничні умови з боку додаткового навантаження, оскільки він досить насичений у співвідношенні навантаження/габаритні розміри.

До недоліків запропонованої системи охолодження можна віднести необхідність живлення приводу вентилятора та необхідність прокладення рукавів для підведення охолоджуючого повітря, а також зміна конструкції агрегату для приєднання патрубків підводу повітря.

#### **Висновки.**

У даній науковій статті було проведено дослідження різних варіантів реалізації систем охолодження для тягових електричних машин з метою визначити їх ефективність та доцільність в різних умовах використання. Основні результати і висновки статті можуть бути узагальнені наступним чином:

Примусова повітряна вентиляція залишається одним із найпоширеніших методів охолодження для тягових електричних машин, особливо для локомотивів з невеликою потужністю. Її використання є виправданим з точки зору ефективності та вартості.

Самовентиляція за допомогою вбудованих вентиляторів є привабливим методом для машин середньої потужності. Вона дозволяє зберігати

відносно економічність і зменшує потребу в додаткових приводах.

Примусове рідинне охолодження виявляється найбільш ефективним методом для високонавантажених тягових електричних машин. Воно забезпечує ефективний відведення тепла та знижує ризик перегріву.

Економічність і ефективність системи охолодження повинні оцінюватися з урахуванням конкретних умов експлуатації та потужності машини.

Подальші дослідження передбачають вивчення можливості комбінування різних методів охолодження для досягнення оптимальних результатів.

#### Список використаних джерел

1. Puzyr V., Datsun, Y., Oboznyi O. Design of algorithm for identification of locomotive electrical machine unit during repair. *International Journal of Engineering & Technology*. 2018. Vol. 7. Issue 4. P. 157–161. DOI: 10.14419/ijet.v7i4.3.19727
2. 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. Sladkowski*. Cham: Springer. 2017. P. 217- 239. doi: 10.1007/978-3-319-51502-1\_5.
3. Тартаковський Е.Д., Агулов А.Ф., Фалендиш А.П. Теорія та конструкція локомотивів. Ч.2. Вибір та розрахунок основних вузлів локомотивів: Навч. посібник. – Харків: УкрДАЗТ, 2009. -150 с

#### INFLUENCE OF THE COOLING SYSTEM ON THE ENERGY INDEXES OF THE TRACTION GENERATOR

Dr. Sc. (Tech.) V. Puzyr, PhD (Tech.) O. Oboznyi, postgraduate student A. Zalata

**Abstract.** *This article discusses the different methods of cooling systems used for traction electric machines. Cooling is an important part of the functioning of such machines, as they can get hot during operation and need an efficient way to dissipate heat to prevent overheating and damage to the equipment.*

*The first part of the article is devoted to the types of cooling systems. It identifies three main methods: forced air ventilation, self-ventilation using built-in fans, and forced liquid cooling, which is the most modern and popular method for highly loaded traction electric machines.*

*The second part of the article discusses the choice of cooling system depending on the locomotive power. The advantages and disadvantages of each cooling method are analyzed on the example of different machine models. It is noted that most shunting diesel locomotives and diesel trains with power up to 1500 hp use air cooling systems, while new models of traction machines prefer liquid cooling.*

*The third part of the article focuses on the advantages of self-ventilation for electric traction machines. It highlights the relative cost-effectiveness of this method, as it does not require the drive of fans for cooling, and provides simplicity and space savings in the location of the locomotive equipment.*

*The overall goal of the article is to help understand the selection of the optimal cooling system for traction electric machines, taking into account their power and efficiency requirements.*

**Keywords:** *diesel locomotive, traction generator, cooling system, self-ventilation.*

Пузыр Володимир Григорович, д-р техн. наук, професор кафедри експлуатації та ремонту рухомого складу Українського державного університету залізничного транспорту. ORCID iD: 0000-0001-6096-9049. Тел.: +38 (050) 401-61-91. E-mail: puzyr.v.g@gmail.com

Обозний Олександр Миколайович, канд. техн. наук, старший викладач кафедри експлуатації та ремонту рухомого складу Українського державного університету залізничного транспорту. ORCID iD: 0000-0002-0843-6023. Тел.: +38 (050) 303-45-59. E-mail: oboznyi@kart.edu.ua

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

Puzyr Volodymyr, Dr. Sc. (Tech.), professor, department of maintenance and repair of rolling stock, Ukrainian State University of Railway Transport. ORCID iD: 0000-0001-6096-9049.

Tel.: +38 (050) 401-61-91. E-mail: puzyr.v.g@gmail.com  
Oboznyi Oleksandr, PhD (Tech.), senior lecturer, department of maintenance and repair of rolling stock, Ukrainian State University of Railway Transport. ORCID iD: 0000-0002-0843-6023.

Tel.: +38 (050) 303-45-59. E-mail: oboznyi@kart.edu.ua  
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

СЕРІКОВ Я.О., канд. техн. наук (Український державний університет залізничного транспорту)

КОСТИРКІН О.В., канд. техн. наук (Український державний університет залізничного транспорту)

БРУСЕНЦОВ В.Г., д-р техн. наук (Український державний університет залізничного транспорту)

## Менеджмент системи «диспетчер служби залізничного транспорту – виробниче середовище» на основі ідеології систем і системного аналізу

*Анотація.* Визначена проблема збереження здоров'я диспетчерів служби залізничного транспорту. На основі методології системного аналізу визначений перелік вирішуваних завдань, комплекс негативних факторів виробничого середовища, що впливають на їх психофізіологічний стан. Виконане проектування системи менеджменту комплексу складових охорони праці: гігієни, технологічної та електричної безпеки виробничих процесів. Система призначена для вирішення завдання мінімізації ушкодження здоров'я диспетчерів, підвищення надійності прийняття їх поточних виробничих завдань

**Ключові слова:** залізничний транспорт, диспетчер, системний аналіз, менеджмент, охорона праці, надійність прийняття рішень

*Annotation.* Preserving the health of workers is an urgent task of modern times. Currently, such a task in the USA and Canada is included in their development strategies. The state of solving this task shows that the working conditions of railway transport personnel, especially dispatchers, in many cases need improvement. The importance of its solution is due to the specifics of their production activity. Based on the system analysis, the following two main features were identified. 1 - the production activity of dispatchers is characterized by a significant list of tasks that differ in the nature of the work performed. This causes the need to frequently switch the type of their activity. This mode of work leads to significant mental and physiological stress on their body. 2 – high responsibility for the decisions made, since the reliability of the work of the specified production area depends on their adequacy. This leads to a high level of psychological stress, especially in extreme and emergency situations. Therefore, the task of ensuring proper working conditions, which are regulated by normative legal acts, is complemented by the need to develop measures to ensure the requirements of workplace ergonomics, an effective «work-rest» regime. At the same time, for example, when improving microclimatic conditions, it is necessary to ensure optimal parameter values, and in the case of improving the system of artificial production lighting, it is necessary to take into account not only quantitative, but also qualitative characteristics of light sources. Therefore, the production environment should be organized with the implementation of not only the regulated provisions of regulatory and legal acts. Such engineering solutions must take into account the requirements of ergonomics and other organizational and technical solutions aimed at ensuring the comfort of the production environment. Based on this, the solution of the problem under consideration requires a complex system approach. The implementation of this approach in the premises of dispatching services of railway transport is planned using the developed adaptive system for managing the parameters of the production environment. The algorithm structure of the corresponding software is described. The developed methodology for creating an adaptive management system is universal.

**Key words:** railway transport, dispatcher, system analysis, management, labor protection, reliability of decision-making

**Вступ.**

Невід'ємною складовою стратегії розвитку економічно розвинутих країн, в тому числі ЄС, США, Канади, є збереження здоров'я працівників, у тому числі й у галузі залізничного транспорту, шляхом вирішення завдань удосконалення охорони праці. Вдосконалення існуючих, проєктування нових шляхів створення безпечних і нешкідливих виробничих умов з урахуванням активізації впровадження передових розробок як у сфері інформаційних технологій, так і виробничого обладнання в цих країнах ставиться на державному рівні, отже є стратегічним завданням [1, 2]. Така позиція держав має, як головну мету, досягнення розуміння керівниками підприємств того об'єктивного факту, що організація комфортних робочих місць, робочої зони з метою збереження здоров'я працюючих є системним елементом сучасного конкурентоспроможного бізнесу. Це обумовлене тим, що доведення тих умов праці, що характеризуються наявністю шкідливих чи небезпечних виробничих факторів, неналежною організацією робочого місця праці до нормативних забезпечить збереження здоров'я працюючої людини при одночасному підвищенні якості, продуктивності праці, а отже й конкурентоздатності підприємства. В нашій країні також приділяють достатньо значну увагу вирішенню таких завдань.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.**

Опубліковані результати досліджень свідчать, що умови праці працівників на підприємствах, в тому числі й диспетчерів служби залізничного транспорту в багатьох випадках потребують вдосконалення [3 - 5]. В основному це обумовлено відсутністю системного підходу до вирішення завдання, менеджменту охорони праці цієї категорії працюючих, а також визначається недостатнім розумінням окремими керівниками важливості вирішення завдань охорони праці, ергономіки на кожному робочому місці. У результаті проведеного аналізу публікацій, що спрямовані на вирішення цього завдання, визначено, що його вирішення, стосовно даного періоду часу, має такі основні два напрямки [6, 7]: 1 - запровадження належних (встановлених) безпечних і не шкідливих параметрів для визначених робочих місць, відділів, структурних одиниць, що входять до структури підприємства; 2 - введення методу компенсації ушкодження здоров'я працівника при його роботі з безпосередньою дією на нього негативних виробничих факторів в робочій зоні. Цей метод заснований на використанні результатів атестації робочих місць за умовами праці.

Завдання, що вирішують за першим напрямком, являють собою, наприклад, нормалізацію рівня освітленості, мікрокліматичних умов, вентиляції виробничих приміщень тощо, на окремих виробничих ділянках, тобто представляють собою локальні заходи з охорони праці. Опубліковані також результати досліджень, що спрямовані на вдосконалення більш специфічних елементів та умов праці (ергономіки, виробничої санітарії при роботі на відкритому повітрі тощо) [6, 7]. На додаток, при реалізації положень

нормативно-правових актів з охорони праці не враховують негативний вплив комбінацій шкідливих виробничих факторів [7]. Очевидно, що такі рішення в сукупності позитивно впливають на економічні показники виробничої діяльності підприємств, але не вирішують завдання збереження трудового потенціалу в комплексі.

Реалізація другого напрямку обумовлює наступне. Метод компенсації ушкодження здоров'я працівника за своєю сутністю не вирішує завдання збереження здоров'я, так як в його ідеології не закладена функція покращення умов праці. Тобто фактично елементи, взаємозв'язки, що існують в системі «людина – виробниче середовище», не підлягають зміні для її вдосконалення з метою досягнення цілі системи – забезпечення необхідної продуктивності праці за умови збереження здоров'я працівника. При цьому людина знаходиться в умовах дії на неї недопустимого рівня, наприклад, шкідливого фактору, а втрату здоров'я працівника, яка виникає внаслідок таких умов виробничої діяльності, компенсують організаційними чи матеріальними заходами (додаткова відпустка, доплати до тарифної ставки тощо). Потрібно вказати, що при такому рішенні, на доповнення до ушкодження здоров'я працівника, формуються й додаткові достатньо значні матеріальні затрати підприємства, спрямовані на реалізацію таких компенсацій [7 - 9]. Виходячи з цього слідує, що застосовувані на даний час рішення з охорони праці не забезпечують комплексного вирішення завдання з досягнення цілі системи «людина – виробниче середовище».

**Визначення мети та завдання дослідження.**

Метою досліджень є створення принципів розробки адаптивної системи «диспетчер служби залізничного транспорту – виробниче середовище» та напрямків реалізації її менеджменту на основі методології систем і системного аналізу.

Завданням дослідження є систематизація з наступним аналізом результатів вітчизняних і зарубіжних публікацій визначеного напрямку, системна оцінка негативних виробничих факторів з розробкою структури менеджменту системи «диспетчер служби залізничного транспорту – виробниче середовище». При вирішенні завдання складова системи «виробниче середовище» розглядається комплексно і включає, як її елементи, умови праці, характерні особливості професійної діяльності диспетчера, його психоемоційний стан, ергономіку робочого місця, режим «праця – відпочинок».

**Основна частина дослідження.**

Постановка вирішуваного завдання визначає, що з метою його вирішення необхідно провести аналіз виробничих функцій, робіт, що входять до обов'язків диспетчера служби залізничного транспорту. Так, до переліку *основних* виробничих завдань і функцій диспетчера відносяться: - керування протягом зміни визначеною ділянкою, з метою забезпечення безперебійного руху поїздів; - постійне керівництво

працівниками, які обслуговують об'єкти, що відносяться до визначеної ділянки, з високою оперативністю прийняття рішень; - постійний контроль роботи станцій, який полягає у визначенні й запровадженні необхідних заходів щодо формування та відправлення поїздів відповідно до графіка руху, надання вказівок щодо руху поїздів черговим по станціях; - постійний контроль по відеотерміналу за рухом поїздів; - оперативне диспетчерське управління обладнанням підстанцій систем електропостачання залізничного транспорту; - отримання, накопичення, аналіз і розподіл інформації про функціонування визначеної ділянки, з обов'язковою позначкою всіх порушень нормальної роботи та їх причини; - анімація на мнемосхемі й реєстрація поточного стану керованої ділянки залізничного транспорту; - автоматичне звукове та візуальне оповіщення головного диспетчера й операторів СДК про вихід обладнання чи значень параметрів об'єктів, які керуються, за допустимі режими; - оперативне форматування й представлення на моніторах комп'ютеризованих робочих місць стану технологічного обладнання системи електропостачання залізничного транспорту та вироблення необхідних рекомендацій для дій диспетчера і оператора ЦДП; - формування звітної документації, яка відображає якість роботи диспетчерського пункту в цілому і якість функціонування окремих ділянок, їх виробничих установок; - архівування, періодичне вивчення протоколів, що утримують: - дії операторів; - комутацію обладнання; - реєстри не штатних подій і спрацювання систем захисту в мережі електропостачання залізничного транспорту.

Виходячи з переліку основних функціональних обов'язків диспетчерів можна визначити, що виконання виробничих обов'язків супроводжується наступними характерними особливостями, які діють негативно на їх психофізіологічний стан: - підвищена відповідальність за прийняті рішення; - необхідність максимального використання технічних засобів для забезпечення параметрів руху на контрольованій ділянці, безперешкодного просування поїздів, скорочення часу обробки їх на станціях; - виконання ряду завдань, обробки інформації в умовах дефіциту часу, що на додаток супроводжується підвищеною відповідальністю за кінцевий результат; - часте перемикання на інший вид виробничої діяльності: - аналізуванню стану структури й елементів мнемосхеми; - вивчення сутності аварійної ситуації й розроблення схеми комутаційних перемикачів; - передавання чи прийняття інформаційних повідомлень з використанням засобів зв'язку; - форматування оперативного звіту тощо; - робота за ПК; - робота з відеотерміналами комп'ютерів тощо. Тобто праця диспетчерів служби залізничного транспорту відноситься фактично до категорії розумової праці. Згідно з положеннями нормативного документу «Гігієнічна класифікація праці за показниками шкідливості та небезпечності факторів виробничого середовища, важкості та напруженості

трудового процесу», наказ МОЗ від 08.04.2014 № 248, вид такої діяльності (праці) відноситься до категорії шкідлива - напружена праця [10]. З цього слідує, що визначені особливості в професійній діяльності диспетчерів обумовлюють такі негативні умови праці, які характеризуються реальними факторами ризику виникнення професійно обумовлених як фізичних, так і психічних захворювань [11, 12]. На додаток до психоемоційної напруженості, в значній кількості випадків спостерігаються й недоліки санітарно-гігієнічного стану робочої зони, організації робочого місця. У результаті цього в робочій зоні присутні й такі (основні) виробничі шкідливості [13], що також негативно впливають на самопочуття, стан здоров'я диспетчера: - негативні фактори, що виникають при роботі на комп'ютері: - не дотримання вимог ергономіки при організації робочого місця з ПК; - негативний вплив електромагнітного випромінювання, електростатичного поля та ін.; - незадовільні параметри мікроклімату; - незадовільні якісні характеристики світлового потоку системи штучного освітлення; - нераціональна організація режиму «праця – відпочинок».

Напружена нерухома поза диспетчера при роботі за ПК може викликати гіпокінезію, що призводить до втоми, оніміння ший, порушення кровообігу в кистях рук, поясна частині тіла та появу больових відчуттів у суглобах плечей, хребті [14]. Такий стан посилюється при недотриманні вимог ергономіки до організації робочого місця [15]. На додаток до цього, при роботі ПК диспетчер підпадає під негативний вплив електромагнітного поля, яке формується в області робочого місця. Згідно з результатами досліджень, що проведені Центром електромагнітної безпеки, в людини за таких умов можуть відбуватися значні негативні зміни в обміні речовин, порушення гормонального стану, специфічні зміни в діяльності й структурі біострумів мозку [16, 17].

Як показує практика, у виробничих приміщеннях диспетчерських залізничного транспорту параметри мікроклімату, особливо – температура, відносна вологість повітря робочої зони, досить часто не відповідають *допустимим* значенням при низьких температурах зовнішнього повітря в холодний період року й при високих у – теплий. Так як виробнича діяльність диспетчерів характеризується високою напруженістю трудового процесу, то такий стан мікрокліматичних умов негативно впливає не тільки на їх самопочуття, стан здоров'я, а й на якість та ефективність виконуваної роботи. Враховуючи ці особливості, Положеннями нормативно-правових актів з охорони праці визначено, що для працюючих такої категорії праці повинні необхідно забезпечувати *оптимальні* значення мікрокліматичних параметрів робочої зони [14].

Кількісні характеристики – рівень штучного освітлення робочої зони у виробничих приміщеннях диспетчерської служби залізничного транспорту, в більшості випадків відповідають його нормативним значенням [18]. Але, при цьому, в більшості випадків

не приділяється належної уваги до забезпечення його якісних характеристик – коефіцієнту пульсації світлового потоку, колірної температури джерел світла, тобто не враховується, що ці характеристики безпосередньо впливають на психоемоційний стан людини, її ЦНС [19].

Враховуючи описані вище особливості виробничого процесу диспетчерів, умови їх праці, з метою підвищення надійності прийняття їх рішень та збереження здоров'я, формується необхідність розробки адаптивної системи менеджменту системи

«диспетчер служби залізничного транспорту – виробниче середовище», в якій необхідно передбачити функціонування в реальному масштабі часу. При цьому, для досягнення мети її розробка повинна бути реалізована на основі ідеології систем і системного аналізу. Для прикладу на рисунку 1 представлена спрощена підсистема «диспетчер залізничного транспорту – робоче місце з ПК» розглядуваної системи «диспетчер служби залізничного транспорту – виробниче середовище».



Рис. 1. Спрощена підсистема «диспетчер залізничного транспорту – робоче місце з ПК»

Реалізація такої системи можлива на основі спеціалізованої комп'ютерної програми. В алгоритмі такої програми повинні бути передбачені наступні структурні елементи: 1 - бази даних з такою інформацією: а - перелік законодавчих актів, нормативно-правових документів, в яких визначені вимоги з гігієни, безпеки праці, виробничої санітарії, електробезпеки, ергономіки стосовно виробничого, санітарно-гігієнічного приміщень та кімнати відпочинку (релаксації) диспетчерської; б - визначені об'єкти, робочі місця, на яких необхідно забезпечувати й контролювати дотримання вимог складових охорони праці й додержання встановленого нормативними документами режиму «праця – відпочинок» та ін.; в - результати й термін проведення навчань з підвищення професійної кваліфікації й перевірки знань з охорони праці; г - терміни проведення й результати проведених медичних оглядів, яким підлягає персонал визначених категорій. 2 - результати проведення поточної наглядової діяльності й контролю за станом охорони праці, особливо на визначених об'єктах. 3 - блок розробки дій управління системою, які необхідні, наприклад, при порушенні нормативних параметрів виробничого середовища в ЦДП чи змінах у законодавстві про охорону праці. Ефективність такої системи можна суттєво підвищити з застосуванням засобів штучного інтелекту.

Слід зазначити, що наявний рівень розвитку комп'ютерних інформаційних технологій дозволяє вирішити завдання розробки такого програмного

забезпечення без суттєвих економічних затрат. Така система буде ефективним рішенням актуального завдання - збереження здоров'я диспетчерів залізничного транспорту. Запровадження системи забезпечить і підвищення ефективності й продуктивності праці, що є похідними забезпечення комфортного рівня виробничого середовища.

#### Висновки.

Показники виробничої діяльності СДК залежать не тільки від кваліфікації диспетчерів, а й безпосередньо від такого фактору як психофізіологічний стан їх організму, який залежить, в основному, від рівня організації виробничого середовища до головних параметрів якого входить професійне навантаження, умови праці, режимом «праця – відпочинок». Представлена в статті розроблена методологія побудови системи «диспетчер СДК – виробниче середовище» спрямована на досягнення мети - «реалізація адаптивного менеджменту охорони праці для збереження здоров'я диспетчерського персоналу». Використання принципів системного аналізу дало змогу врахувати комплекс особливостей його виробничої діяльності, умови праці й психофізіологічне навантаження.

Методологія, принципи побудови системи можуть бути реалізовані в інших галузях виробничої діяльності.

#### Список використаних джерел

1. Стратегія розвитку США в завданнях охорони праці. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.znakcomplex.ru/poleznosti/example/a-kak-u-nix/oxrana-truda-v-ssha.html>
2. Стратегія розвитку країн ЄС в завданнях охорони праці. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: [http://pmguinfo.dp.ua/images/documents/ohrana\\_truda/upravl\\_ot.pdf](http://pmguinfo.dp.ua/images/documents/ohrana_truda/upravl_ot.pdf)
3. Серіков Я. О., Нікітченко О. Ю., Серікова К. С. Стан та проблеми виробничого й побутового електротравматизму в Україні / НТЗ «Комунальне господарство міст», 2021, т. 4, вип. 164, с. 234 – 239. – Режим доступу: <https://khg.kname.edu.ua/index.php?journal=khg&page=article&op=view&path%5B%5D=5844&path%5B%5D=5763>
4. Серіков Я. О., Хворост М. В., Панасенко С.М. Стан охорони та безпека праці в АК «Харківобленерго» / Матер. Міжнар. н-т. конф. «Енергоефективна техніка та технології» // НТЗ «Комунальне господарство міст» № 118 (1), Харків : ХНУМГ, 2014. С. 152 – 154. – Режим доступу: <https://khg.kname.edu.ua/index.php?journal=khg&page=article&op=view&path%5B%5D=4963>
5. Серіков Я. О. Комплексний статистичний аналіз причин виробничого травматизму в галузі електроенергетики України / Матер. V Міжнар. н-т конф. «Новітні технології в електроенергетиці», Харків: ХНУМГ, 2015. С. 64-66
6. Голинько В. І., Іконніков М. Ю., Лебедев Я. Я. Охорона праці в галузі інформаційних технологій. МОН України, Нац. гірн. ун-т. – Дніпропетровськ : НГУ, 2015. – 246 с.
7. Серіков Я. О. Промислова безпека та соціальний захист працівників виробничих підприємств, компаній і корпорацій (організація монтажу, ремонту і експлуатації виробничих об'єктів) Харків : ХНУМГ – корпорація ШЕЛЛ, 2015. – 247 с.
8. Поторочин С. О., Захарова О. В. Стан охорони праці в розрізі кількості нещасних випадків на виробництві за причинами / Ефективна економіка, № 5, 2012. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://www.economy.nayka.com.ua/?op=1&z=1183>
9. Ткаченко І. В., Шпарка І. І. Виробничий травматизм – проблема сучасності: актуальні аспекти, причини та шляхи запобігання / Охорона праці на підприємствах, КНТЕУ. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: [http://chtei-knteu.cv.ua/herald/content/download/archive/2013/v2/NV-2013-V2\\_69.pdf](http://chtei-knteu.cv.ua/herald/content/download/archive/2013/v2/NV-2013-V2_69.pdf)
10. Гігієнічна класифікація праці за показниками шкідливості та небезпечності факторів виробничого середовища, важкості та напруженості трудового процесу, наказ МОЗ від 08.04.2014 № 248. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0472-14#Text>
11. Професійно значущі психологічні якості диспетчерської служби залізничного транспорту [Електронний ресурс]. – Режим доступу: [http://www.rusnauka.com/4\\_SND\\_2009/Psihologia/40378\\_doc.htm](http://www.rusnauka.com/4_SND_2009/Psihologia/40378_doc.htm)
12. Серіков Я. О. Психологічні аспекти забезпечення промислової безпеки персоналу виробничих підприємств / Матер. VI Междунар. науч.-теорет. интернет-конф. «Город. Культура. Цивілізація.». Харків : ХНУГХ, 2016. С. 257 – 260.
13. Міждержавний ДСТУ 12.0.003-2015\*. ССБТ. Небезпечні і шкідливі виробничі фактори. Класифікація. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://docs.cntd.ru/document/1200136071>
14. НПАОП 0.00-7.15-18 Вимоги щодо безпеки та захисту здоров'я працівників під час роботи з екранними пристроями. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: [http://sop.zp.ua/norm\\_npaop\\_0\\_00-7\\_15-18\\_01\\_ua.php](http://sop.zp.ua/norm_npaop_0_00-7_15-18_01_ua.php)
15. Office ergonomics. The European Agency for Safety and Health at Work. 2013. – 14 p. [Електронний ресурс]. – URL: <https://osha.europa.eu/en>
16. Korzeniowski L. F., Serikov Y. A. (współautor, 50%): Europejski wymiar securitologii. Monograf. Kraków: EAS, 2012. - 244 s.
17. Голинько В. И., Лебедев Я. Я., Дубей В. В. Охрана труда при работе с персональными компьютерами. – Днепропетровск: Наука и образование, 2006. - 313 с.
18. ДБН В.2.5-28:2018. Природне і штучне освітлення.
19. Serikov J. Serikova K. (2021) Theoretical justification and practical aspects of implementation of Human Centric Lighting Program in production conditions / Ukrainian Metrological Journal, Kharkiv, 2021, No 1. С. 40-45. URL: <file:///C:/Users/User/Downloads/228235-%D0%A2%D0%B5%D0%BA%D1%81%D1%82%20%D1%81%D1%82%D0%B0%D1%82%D1%82%D1%96-519494-1-10-20210331.pdf>

#### SYSTEM MANAGEMENT «RAIL TRANSPORT SERVICE DISPATCHER – PRODUCTION ENVIRONMENT» BASED ON SYSTEMS IDEOLOGY AND SYSTEMS ANALYSIS

**PhD (Tech.) Ya. Serikov, PhD (Tech.) O. Kostyrkin, Dr. Sc. (Tech.) V. Brusentsov**

*Annotation. Preserving the health of workers is an urgent task of modern times. Currently, such a task in the USA and Canada is included in their development strategies. The state of solving this task shows that the working conditions of railway transport personnel, especially dispatchers, in many cases need improvement. The importance of its solution is due to the specifics of their production activity. Based on the system analysis, the following two main features were identified. 1 - the production activity of dispatchers is characterized by a significant list of tasks that differ in the nature of the work performed. This causes the need to frequently switch the type of their activity. This mode of work leads to significant mental and physiological stress on their body. 2 – high responsibility for the decisions made, since the reliability of the work of the specified production area*

*depends on their adequacy. This leads to a high level of psychological stress, especially in extreme and emergency situations. Therefore, the task of ensuring proper working conditions, which are regulated by normative legal acts, is complemented by the need to develop measures to ensure the requirements of workplace ergonomics, an effective «work-rest» regime. At the same time, for example, when improving microclimatic conditions, it is necessary to ensure optimal parameter values, and in the case of improving the system of artificial production lighting, it is necessary to take into account not only quantitative, but also qualitative characteristics of light sources. Therefore, the production environment should be organized with the implementation of not only the regulated provisions of regulatory and legal acts. Such engineering solutions must take into account the requirements of ergonomics and other organizational and technical solutions aimed at ensuring the comfort of the production environment. Based on this, the solution of the problem under consideration requires a complex system approach. The implementation of this approach in the premises of dispatching services of railway transport is planned using the developed adaptive system for managing the parameters of the production environment. The algorithm structure of the corresponding software is described. The developed methodology for creating an adaptive management system is universal.*

**Key words:** railway transport, dispatcher, system analysis, management, labor protection, reliability of decision-making

Серіков Яків Олександрович, канд. техн. наук, доцент кафедри Охорони праці та безпеки життєдіяльності Харківського національного університету міського господарства імені О. М. Бекетова. ORCID iD: 0000-0002-3463-2079. Тел.: +38 (050)9088828. E-mail: [s0509088828@gmail.com](mailto:s0509088828@gmail.com)

Костиркін Олег Володимирович, канд. техн. наук, доцент, завідувач кафедри «Охорона праці та навколишнього середовища» Українського державного університету залізничного транспорту  
Брусенцов Віталій Гаврилович, д-р техн. наук кафедри «Охорона праці та навколишнього середовища» Українського державного університету залізничного транспорту

## Редакційна колегія

Бабасв М. М., д.т.н., професор, УкрДУЗТ;

Бутько Т. В., д.т.н., професор, УкрДУЗТ;

Гаврилюк В. І., д.ф-м.н., професор,  
Український державний університет науки і технологій;

Доценко С. І., д.т.н., доцент, УкрДУЗТ;

Жуковицький І. В., д.т.н., професор,  
Український державний університет науки і технологій;

Каргін А. О., д.т.н., професор, УкрДУЗТ;

Климаш М. М., д.т.н., професор,  
НУ «Львівська політехніка»;

Zbigniew Łukasik Kazimierz Pulaski  
University of Humanities and Technology in  
Radom, Professor;

Ломотько Д. В., д.т.н., професор, УкрДУЗТ

Mareks Mezitis, Dr.sc.ing., Head of Scientific  
Institution Transporta Akadēmija, Rīga,  
Latvija;

Мойсеєнко В. І., д.т.н., професор, УкрДУЗТ;

Панченко С. В., д.т.н., професор, УкрДУЗТ;

Приходько С. І., д.т.н., професор, УкрДУЗТ,  
головний редактор;

Рубан І. В., д.т.н., професор, ХНУРЕ;

Серков О. А., д.т.н., професор, НТУ «ХП»;

Скалозуб В. В., д.т.н., професор,  
Український державний університет науки і технологій;

Трубчанінова К. А., д.т.н., професор, УкрДУЗТ;

Thierry Horsin, Enseignant chercheur au  
CNAM (PU);

Штомпель М. А., д.т.н., професор, УкрДУЗТ

## © Журнал "Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті" - Informacijno-kerujuchi systemy na zaliznychnomu transporti

*Свідоцтво про державну реєстрацію*

*Серія КВ № 21514-11414 ПП від 18. 08. 2015 р.*

*Засновник - Український державний університет залізничного транспорту, майд. Фейєрбаха, 7, м. Харків, 61050*

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

*Зареєстровано 24 жовтня 2001 р. у Centre International de l'ISSN, 75002 PARIS, France.*

*Журнал входить до Переліку наукових фахових видань України, категорія «Б» (наказ Міністерства освіти і науки України № 409 від 17 березня 2020 р. зі змінами від 02.07.2020 р. № 886 )*

*Журнал включено до міжнародної наукометричної бази даних Index Copernicus (<http://journals.indexcopernicus.com/++++.p24787015.3.html>), Google Scholar (<https://scholar.google.com>), науково-видавничої платформи «Наукова періодика України» (<http://jiks.kart.edu.ua>).*

*Затверджений до друку Вченою радою УкрДУЗТ*

*Рецензування проводиться конфіденційно за принципами double-blind*

*Статті друкуються мовою оригіналу*

*Редакція не обов'язково поділяє думку автора і не відповідає за фактичні помилки, яких він припустився*

*Передрук матеріалів – тільки з дозволу редакції журналу*

*Індекс журналу у Каталозі передплатних видань України – 48707*

*Адреса редакції: Україна, 61050, Харків-50,  
майд. Фейєрбаха, 7, УкрДУЗТ, корп. 1, к. 215.*

*Тел.: (057) 730-10-84, 730-10-82. E-mail: xiittc@ukr.net*

*Відповідальна за випуск Харін Р.О.*

*Редактор Ібрагімова Н. В.*

*Підписано до друку 29.11.2023 р. Формат 60x84 1/8.*

*Папір писальний. Ум.-вид. ар. 5,5 Зам №*

*Наклад 105 прим. Ціна договірна.*

*Частина тиражу розповсюджується безкоштовно.*

*Видавець та виготовлювач*

*Український державний університет залізничного транспорту,  
61050, Харків-50, майдан Фейєрбаха, 7.*

*Свідоцтво суб'єкта видавничої справи ДК № 6100 від 21.03.2018 р.*