УДК 667.021.1 DOI https://doi.org/10.35546/kntu2078-4481.2025.2.1.25

В. Е. ПРИХОДЬКО
аспірант кафедри транспортних технологій
Національний університет «Львівська політехніка»
ORCID: 0000-0002-7582-1693

ЗНАХОДЖЕННЯ ІНТЕГРАЛЬНОГО ІНДЕКСУ ЕНЕРГЕТИЧНОЇ І ТРАНСПОРТНОЇ ЕФЕКТИВНОСТІ ФУНКЦІОНУВАННЯ АВТОПОЇЗДІВ ДЛЯ МІЖНАРОДНИХ ПЕРЕВЕЗЕНЬ

У роботі запропоновано, розроблено та обґрунтовано експертно-функціональну модель оцінювання енергетичної і транспортної ефективності, призначену для оптимального вибору одноланкових автопоїздів, які залучаються до здійснення міжнародних перевезень вантажів транспортними коридорами США та Україна – ЄС. Основна ідея дослідження полягає у визначенні інтегрального індексу ефективності функціонування автопоїзда на основі системного підходу з урахуванням широкого спектра факторів, що впливають на енергетичну та транспортну складові експлуатації.

Модель базується на декомпозиції функціонально-експлуатаційних характеристик, що дозволяє виокремити окремі чинники енергетичної та транспортної ефективності. Такий підхід дає змогу детально проаналізувати структуру і взаємозв'язки між параметрами, що визначають раціональність використання конкретних конфігурацій автопоїздів у різних умовах експлуатації. Задля кількісного оцінювання ефективності застосовується інтегральний індекс, сформований у вигляді зваженої лінійної комбінації визначених показників. При цьому значення вагових коефіцієнтів для кожного з чинників визначаються за допомогою методу аналітичної ієрархії Т. Сааті, що забезпечує математичну обґрунтованість та об'єктивність вибору.

Розроблений критерій дозволяє враховувати проєктні параметри основних конструктивних елементів, технічні характеристики агрегатів і механізмів тягача та причепа, забезпечуючи високий рівень точності при прогнозуванні ефективності функціонування автопоїзда у системі міжнародних вантажних перевезень. Результати дослідження можуть бути використані для покращення транспортної логістики, оцінювання економічної доцільності автоперевезень та розробки політик сталого розвитку у сфері автомобільного транспорту.

Ключові слова: *автопоїзд, двигун, трансмісія, шасі, ходова частина, системи керування, ефективність, міжнародні перевезення.*

V. E. PRYKHODKO
Postgraduate Student at the Department of Transport Technologies
Lviv Polytechnic National University
ORCID: 0000-0002-7582-1693

INTEGRAL INDEX EVALUATION OF ENERGY AND TRANSPORT EFFICIENCY IN ROAD TRAINS FOR INTERNATIONAL FREIGHT TRANSPORT

The paper proposes, develops, and substantiates an expert-functional model for evaluating energy and transport efficiency, intended for the optimal selection of single-link road trains involved in international freight transportation along the corridors of the USA and Ukraine–EU. The main idea of the study is to determine an integrated efficiency index for the operation of road trains using a systems approach, taking into account a wide range of factors influencing the energy and transport aspects of operation.

The model is based on the decomposition of functional-operational characteristics, which allows the identification of individual factors of energy and transport efficiency. This approach enables a detailed analysis of the structure and interrelationships between parameters that determine the rational use of specific road train configurations under various operating conditions. To provide a quantitative assessment of efficiency, an integral index is applied, formulated as a weighted linear combination of defined indicators. The weighting coefficients for each factor are determined using T. Saaty's Analytic Hierarchy Process (AHP), ensuring mathematical justification and objectivity in the selection process.

The developed criterion takes into account the design parameters of key structural elements, as well as the technical characteristics of the tractor and trailer units, ensuring a high level of accuracy in forecasting the operational efficiency of road trains in international freight transport systems. The research results can be used to improve transport logistics, assess the economic feasibility of road freight transportation, and support the development of sustainable transport policies.

Key words: *road train, engine, transmission, chassis, running gear, control systems, efficiency, international transportation.*

Вступ

За статистичними даними оглядів ринку міжнародних вантажних перевезень транспортними коридорами мережі Україна – ЄС зросла значущість засобів перевезення, розвитку альтернативних маршрутів доставки і урізноманітнення постачальників для забезпечення стабільності та надійності переміщення товарів. Ситуація, що склалася в галузі перевезення вантажів автомобільним транспортом, характеризується необхідністю постійного оновлення автомобілів-тягачів, причепів і напівпричепів особливо великої місткості. Для поповнення парку таких автотранспортних засобів шляхом імпорту слід більш повно враховувати міжнародний досвід. Це, перш за все, застосування у міжнародних і міжміських перевезеннях автомобільних поїздів збільшеної довжини, завантажувального об'єму та вантажності [1, 2]. При виборі транспортного засобу і комплектації автопоїзда для виконання міжнародних вантажних перевезень потрібно вирішувати велику кількість завдань із застосуванням складних математичних моделей. Для дослідження ефективності автопоїздів розроблено багато кількісних комплексних та узагальнених показників, які переважно, дозволяють оцінювати окремі частини автопоїзда. Проте, проблема вибору автопоїзда для виконання міжнародних вантажних перевезень, залишається актуальною.

Постановка проблеми

Розглянути задачу розроблення експертно-функціональної моделі обчислення інтегрального показника енергетичної та транспортної ефективності сучасних дизельних одноланкових автопоїздів для міжнародних вантажних перевезень.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Дослідження ефективності одноланкових автопоїздів, які описані у відкритих наукових джерелах, базуються на аналізі ключових параметрів, таких як: повна маса G_a (кг); потужність двигуна G_a (кВт); максимальна швидкість $V_{\max}$ (км/год); кліренс h (мм); колісна база L (мм); передавальне число трансмісії U; жорсткість підвіски k (Н/м); гальмівна сила F_{br} (Н) тощо [3]. За експлуатаційними властивостями, такими як тягово-швидкісні; гальмові; паливо-економічні; керованість; маневреність і прохідність, визначено характер руху одноланкового автопоїзда під час міжнародних вантажних перевезень, середню швидкість у конкретних умовах і продуктивність.

Зокрема розглядаються: динамічні моделі рушія одноланкового автопоїзда; вивчається взаємодія параметрів (наприклад, U, k) з коефіцієнтом корисної дії (ККД) колісного рушія; оптимізація розподілу крутних моментів: для багатовісних систем раціональний розподіл моментів між колесами залежить від положення центру мас, коефіцієнтів зчеплення та опору коченню; вплив деформованих поверхонь: аналізуються втрати енергії при русі на дорогах з різною кутовою жорсткістю, що впливає на вибір h та k [3–6, 8–12].

Науковці, які проводили дослідження на базі Харківського національного автомобільно-дорожнього університету (ХНАДУ) [1–4] спеціалізувалися на вивченні енергоефективності та динаміки транспортних засобів, зокрема одноланкових і багатоланкових автопоїздів. При удосконаленні конструкції, з метою підвищення енергоефективності автомобілів, основна увага приділялася підвищенню енергоефективності моторно-трансмісійних установок, гідродинамічним характеристикам, та впливу конструкційних характеристик ходової частини і, зокрема, окремих шин на енергетичні втрати в колісному рушію.

У Національному транспортному університеті під керівництвом професорів Хабутдінова Р. А. [5], Сахно В. П. [6] та Прокудіна Г. С. [7] розвиваються декілька напрямків досліджень у сфері міжнародних вантажних перевезень автопоїздами: математичне моделювання транспортних систем; технології підвищення ефективності; програмно-інструментальне забезпечення та дослідження технічних параметрів автопоїздів.

Викладення основного матеріалу дослідження

Для дослідження і аналізу щодо підвищення ефективності функціонування одноланкових автопоїздів у міжнародному сполученні у цій статті використано теорію енергоресурсної ефективності автомобіля розробленої Хабутдіновим Р. А. [5] і статистичний метод аналітичної ієрархії Т. Сааті [13].

Враховані ключові технічні параметри нових одноланкових автопоїздів на основі модульного підходу за схемою **структурно-параметричної організації конструкції АТЗ** [5]. Згідно теорії Хабутдінова Р. А. [5] процес переміщення автомобіля чи автопоїзда з вантажем забезпечується роботою чотирьох основних пристроїв конструкції: енергоперетворюючого, вантажонесучого, гальмівного і кермового. Оцінювання ефективності функціонування автопоїздів для міжнародних вантажних перевезень здійснено на основі використання кількісних значень ключових параметрів одноланкових автопоїздів, які характеризують важливі властивості їхніх компонент, та підрахунку інтегрального індексу за теорією аналітичної ієрархії Т. Сааті [13]. Згідно з нашим підходом автопоїзд, для якого інтегральний індекс, обчислений на основі застосування теорії аналітичної ієрархії Т. Сааті, рівний найбільшому значенню серед індексів порівнюваних автопоїздів, вважається найкращим за критеріями енергоефективності та транспортної ефективності.

Енергетична ефективність автопоїзда

Енергетична ефективність автопоїзда для міжнародних вантажних автомобільних перевезень – це показник, який відображає здатність автопоїзда ефективно використовувати енергетичні ресурси (паливо для двигуна, мастильні матеріали у трансмісії, електроенергію від акумуляторних батарей для функціонування приладів, фар

тощо) з урахуванням втрат механічної енергії у трансмісії гальмівній і керівній та гідравлічній системах для виконання транспортних завдань з мінімальними витратами.

Ключовими чинниками, які впливають на енергетичну ефективність автопоїзда є: тип двигуна, його маса і максимальний крутний момент, момент інерції обертових елементів трансмісії, передавальне число трансмісії, загальний коефіцієнт передачі крутного моменту.

Експертно-функціональна модель інтегрального показника ефективності дизельного двигуна E автопоїзда для міжнародних вантажних автомобільних перевезень представлена у вигляді [14]:

$$E = w_1 \cdot \frac{T}{m} + w_2 \cdot \frac{\eta \cdot \omega}{I} - w_3 \cdot \alpha + w_4 \cdot \eta_{tr} - w_5 \cdot L_{tr}, \quad (1)$$

де: η_{tr} – безрозмірний коефіцієнт корисної дії трансмісії; L_{tr} – сумарні відносні втрати потужності в трансмісії; $\frac{T}{m}$ – тягові можливості двигуна на одиницю маси, що впливає на динамічні характеристики автопоїзда; $\frac{\eta \cdot \omega}{I}$ – ефективність використання обертальної енергії двигуна та швидкість досягнення максимальної потужності; α – негативний вплив інерційності двигуна на стабільність роботи і його зношення; η_{tr} – ефективність передачі потужності від двигуна до коліс, що безпосередньо впливає на загальну енергоефективність автопоїзда; L_{tr} – втрати в трансмісії, які знижують корисну потужність і динамічні характеристики; w_1, w_2, w_3, w_4, w_5 – вагові коефіцієнти підраховані методом аналітичної ієрархії Т. Сааті [14].

Транспортна ефективність автопоїзда

Транспортна ефективність автопоїзда в міжнародних вантажних перевезеннях є комплексним показником, який відображає здатність автопоїзда ефективно виконувати міжнародні перевезення з мінімальними витратами ресурсів та максимальною продуктивністю, яка включає технічні та організаційні аспекти.

Нижче наведена **таблиця з позначеннями ключових показників транспортної ефективності механізмів одноланкового автопоїзда** (тягач + причіп) за функціонально-конструктивними модулями вантажонесучого, гальмівного та рульового пристроїв. Вказано напрямок монотонної зміни показника (зростання або спадання), що призводить до підвищення ефективності одноланкового автопоїзда, табл. 1.

Таблиця 1

Позначення	Показники	Напрямок зміни для підвищення ефективності	Коментар
P_v	Вантажність (макс. маса вантажу)	Зростання	Збільшує корисну транспортну роботу
$m_к$	Маса порожнього кузова	Спадання	Зменшує власну вагу автопоїзда
J_p	Жорсткість рами	Зростання	Підвищує міцність і довговічність
f	Коефіцієнт опору коченню	Спадання	Знижує енергетичні втрати
R_t	Ресурс шин	Зростання	Зменшує експлуатаційні витрати

Ця таблиця відображає ключові показники, що впливають на транспортну ефективність автопоїзда, з урахуванням напрямку їх зміни.

Енергетична та транспортна технічна ефективність

Інтегральний показник енергетичної та транспортної ефективності визначаємо за формулою:

$$E = w_1 \cdot \left(w_{11} \frac{T}{m} + w_{12} \frac{\eta \cdot \omega}{I} - w_{13}\alpha + w_{14}\eta_{tr} - w_{15}L_{tr} \right) + w_2 \cdot (w_{21}P_v - w_{22}m_к + w_{23}J_p - w_{24}f + w_{25}R_t), \quad (2)$$

де, T – крутний момент двигуна (Н · м); m – маса двигуна (кг); I – момент інерції двигуна (кг · м^2); ω – кутова швидкість двигуна (рад/с); α – кутове прискорення двигуна (рад/с^2); η – коефіцієнт корисної дії двигуна (безрозмірний); η_{tr} – коефіцієнт корисної дії трансмісії (безрозмірний); L_{tr} – сумарні втрати потужності в трансмісії (Вт або безрозмірна величина, що відображає відносні втрати), P_v – вантажопідйомність (макс. маса вантажу); $m_к$ – маса порожнього кузова; J_p – жорсткість рами; f – коефіцієнт опору коченню; R_t – ресурс шини (англ.: tyre).

Параметри двигуна і трансмісії (позначені ваговим коефіцієнтом w_1):

T/m (тягові можливості); $((\eta \cdot \omega)/I)$ (ефективність обертальної енергії колінчастого валу двигуна); α (інерційність); η_{tr} (ККД трансмісії); L_{tr} (втрати в трансмісії).

Параметри транспортної ефективності (позначені ваговим коефіцієнтом w_2):

P_v (вантажність); $m_к$ (маса порожнього кузова); J_p (жорсткість рами); f (коефіцієнт опору коченню); R_t (ресурс шин).

Кожен параметр нормалізований до безрозмірного вигляду.

Напрямок впливу враховано знаком коефіцієнта (наприклад, $m_к$ має негативний вплив).

Сумарна вага критеріїв відповідає їх важливості в ієрархії.

Вагові коефіцієнти у рівнянні (1) визначаємо аналогічно [14] із застосуванням методу аналітичної ієрархії (МАІ) Т. Сааті, [13], який має три етапи:

1. Виконуємо структуризацію систем ієрархічної структури з двома рівнями.
2. На другому етапі виконуються попарні порівняння елементів кожного рівня.
3. Обчислюємо вагові коефіцієнти для елементів кожного рівня. При цьому виконується перевірка якості даних на узгодженість за допомогою визначення індексу узгодженості та відношення узгодженості матриці попарних порівнянь [14]. Індекс узгодженості (*CI*) [13]:

$$CI = (\lambda_{\max} - n)/(n - 1), \tag{3}$$

Відношення узгодженості (*CR*):

$$CR = CI/IO, \tag{4}$$

де $IO = 1{,}12$ при розмірності матриці порівнянь $n = 5$. Матриця попарних порівнянь (2) вважається добре узгодженою, якщо відношення узгодженості $CR \le 0{,}1$ при $n \ge 5$.

Після визначення вагових коефіцієнтів та перевірки їх за допомогою індексу узгодженості та відношення узгодженості, одержуємо остаточно формулу обчислення інтегрального індексу енергетичної та транспортної ефективності дизельного автопоїзда:

$$E = 0.6 \cdot \left(0.4\frac{T}{m} + 0.2\frac{\eta \cdot \omega}{I} - 0.1\alpha + 0.2\eta_{tr} - 0.1L_{tr} \right) + 0.4 \cdot (0.3P_v - 0.25m_к + 0.2J_р - 0.15f + 0.1R_t). \tag{5}$$

Приклад.

Застосовати інтегральний показник енергетичної та транспортної ефективності *E*, який поданий формулою (5), до систем одноланкових автопоїздів **Volvo FM**, **Freightliner Cascadia** (причепи відповідно стандартні) та визначити, яка модель одноланкового автопоїзда ефективніша за цим показником.

Інтегральний показник ефективності *E* для автопоїздів Volvo FM та Freightliner Cascadia розраховано за формулою (5) та використання нормалізованих параметрів.

Результати обчислень

Таблиця 2

Енергетична ефективність автопоїздів Volvo FM і Freightliner Cascadia

Параметри	Volvo FM	Volvo FM нормалізовані	Freightliner Cascadia	Freightliner Cascadia нормалізовані
Крутний момент двигуна, *T*	1750 Н·м	1750/2000 = 0.875	1750 Н · м	1750/2000 = 0.875
Маса двигуна, *m*	1200 кг	1 – 1200/2000 = 0.4	1100 кг	1 – 1100/2000 = 0.45
Момент інерції колінвала двигуна, *I*	18 кг·м²	0.82	16 кг·м²	0.73
Кутова швидкість колінвала двигуна, ω	95 рад/с	$\frac{95}{120} = 0{,}79$	105 рад/с	105/120 = 0.875
ККД двигуна, η	0.40	0.40	0.42	0.42
ККД трансмісії η_{tr}	0.85	0.85	0.88	0.88
Втрати у трансмісії L_{tr}	0.15	0.15	0.12	0.12

Таблиця 3

Транспортна ефективність

Параметр	Volvo FM	Volvo FM нормалізовані	Freightliner Cascadia	Freightliner Cascadia нормалізовані
Вантажність автопоїздів P_v	20 000 кг	20 000/25 000 = 0.8	21000 кг	21 000/25 000 = 0.84
$m_к$	7500 кг	1 – 7500/8000 = 0.0625	7200 кг	1 – 7200/8000 = 0.1
J_p	0.78	0.78	0.82	0.82
f	0.012	0.012	0.010	0.010
R_t	0.85	0.85	0.88	0.88

Інтегральний показник ефективності для автопоїздів Volvo FM та Freightliner

1. Розрахунок для Volvo FM.

Обчислення:

$$E_{Volvo} = 0.6 \cdot (0.4 \cdot 0.875 + 0.2 \cdot 0.385 - 0.1 \cdot 0.1 + 0.2 \cdot 0.85 - 0.1 \cdot 0.15) +$$

$$+ 0.4 \cdot (0.3 \cdot 0.8 - 0.25 \cdot 0.0625 + 0.2 \cdot 0.78 - 0.15 \cdot 0.012 + 0.1 \cdot 0.85) = 0.5286..$$

2. Розрахунок для Freightliner Cascadia

Обчислення:

$$E_{Fr} = 0.6 \cdot (0.4 \cdot 0.875 + 0.2 \cdot 0.503 - 0.1 \cdot 0.1 + 0.2 \cdot 0.88 - 0.1 \cdot 0.12) +$$

$$+ 0.4 \cdot (0.3 \cdot 0.84 - 0.25 \cdot 0.1 + 0.2 \cdot 0.82 - 0.15 \cdot 0.010 + 0.1 \cdot 0.88) = 0.5538.$$

Результати обчислень інтегрального показника порівнянь між автопоїздами Volvo FM і Freightliner Cascadia представлені у табл. 4.

Таблиця 4

Порівняння інтегральних показників автопоїздів Volvo FM і Freightliner Cascadia

Автопоїзд	Інтегральний показник (*E*)
Volvo FM	0.5286
Freightliner Cascadia	0.5538

Freightliner Cascadia має вищий інтегральний показник ефективності (0.5538 проти 0.5286 у Volvo FM). Це обумовлено:

1. Кращими енергетичними параметрами:
- Вищий ККД трансмісії ($\eta_{tr} = 0.88$ проти 0.85).
- Менші втрати в трансмісії ($L_{tr} = 0.12$ проти 0.15).
- Вища ефективність обертальної енергії ($\eta \cdot \omega / I \approx 0.503$ проти 0.385).
2. Кращими транспортними параметрами:
- Вища вантажопідйомність ($P_v = 0.84$ проти 0.8).
- Менший коефіцієнт опору коченню ($f = 0.010$ проти 0.012).
- Вищий ресурс шин ($R_t = 0.88$ проти 0.85).

Отже, за критерієм інтегрального показника ефективності (5) Freightliner Cascadia є більш ефективним автопоїздом порівняно з Volvo FM.

Висновки

Вирішено задачу розроблення експертно-функціональної моделі обчислення інтегрального показника енергетичної та транспортної ефективності сучасних дизельних одноланкових автопоїздів для міжнародних вантажних перевезень. Розроблено та верифіковано математичну модель інтегрального показника енергетичної та транспортної ефективності дизельного одноланкового автопоїзда з пневматичною підвіскою і запропоновано комплексну методику визначення енергетичної та транспортної ефективності одноланкових автопоїздів для виконання міжнародних вантажних перевезень.

Список використаної літератури

1. Динамічні властивості і стабільність функціонування автотранспортних засобів / Д. В. Абрамов, Н. М. Подригало, М. А. Подригало, О. С. Полянський, В. Л. Файст [за ред. Подригало М. А., Полянський О. С.]. Х. : ХНАДУ, 2014. 204 с.

2. Тарасов Ю. В. Наукові основи забезпечення технічного рівня автотранспортних засобів при проектуванні та модернізації : автореф. дис. на здобуття наук. ступення докт. техн. наук: спец. 05.22.02 – автомобілі та трактори / Ю. В. Тарасов. Харків, 2021. 40 с. 119.

3. Потапов М. М. Підвищення ефективності функціонування елементів шасі повноприводних колісних засобів транспорту : автореф. дис. на здобуття наук. ступення канд. техн. наук : спец. 05.22.20 «Експлуатація та ремонт засобів транспорту» / М. М. Потапов. Харків, 2021. 20 с.

4. Омельченко В. І. Поліпшення енергоефективності транспортних засобів шляхом підвищення коефіцієнта корисної дії колісного рушія. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису. Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 274 «Автомобільний транспорт». Харківський національний автомобільно-дорожній університет, Харків, 2024 р.

5. Хабутдінов Р. А. Системна концепція енергоресурсної синергії та методологія технологічно-інноваційного управління на автотранспорті / Р. А. Хабутдінов // Вісник Національного транспортного університету. Серія «Технічні науки». Науковотехнічний збірник. К.: НТУ, 2020. Вип. 1 (46). DOI: 10.33744/2308-6645-2020-1-46-365-374.170

6. В. П. Сахно, С. В. Цимбал, В. М. Поляков, І. С. Мурований, С. М.. Шарай, і М. П. Рой, «Теоретичні засади використання триланкових автопоїздів для виконанні перевезень вантажів», *ВМТ*, вип. 18, вип. 2, с. 155–167, Лют 2024.

7. Прокудін Г. С. Проблеми організації, управління та підвищення ефективності перевезень: стан, проблеми, перспективи розвитку: монографія за ред. Г. С. Прокудіна, Л. М. Савчук. Дніпро: Пороги, 2021. 300 с.

8. Свірін Д. О. Підвищення ефективності міжнародних автомобільних перевезень вантажів у логістичних ланцюгах – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису. Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.22.01 «Транспортні системи» (275 Транспортні технології (на автомобільному транспорті)) Національний транспортний університет Міністерства освіти і науки України, Київ, 2021. 160 с.

9. Поляков А. П., Гречанюк М. С.. Аналіз шляхів підвищення стійкості та керованості вантажних автомобілів з напівпричепами. Поляков А. П. Аналіз шляхів підвищення стійкості та керованості вантажних автомобілів з напівпричепами [Текст] / А. П. Поляков, М. С. Гречанюк // Вісник Вінницького політехнічного інституту. 2010. № 5. С. 90–95.

10. Бегерський Д. Б., Коваль А О. Вплив геометричних параметрів автопоїзда на його аеродинамічні характеристики. Сучасні технології та перспективи розвитку автомобільного транспорту: тези XV міжнародної науково-практичної конференції, 24–26 жовтня 2022 року. Житомир: Житомирська політехніка, 2022. С. 23–24.

11. Вікович І. А. Теорія руху транспортних засобів. Підручник з грифом Мін. освіти і науки молоді та спорту України. – Львів : Видавництво Львівської політехніки, 2013. 672 с.

12. Гащук П. Автомобіль: Теорія колісного рушія.-Київ Видавничий дім «Кондор», 2018. 328 с. 191 + 5 іл., 3 табл., Бібліогр.: 39 назв.

13. Сааті Т. Л. Аналітичний ієрархічний процес: планування, визначення пріоритетів, розподіл ресурсів. Нью-Йорк : McGraw-Hill International Book Co., 1980. 287 с.

14. Приходько В. Е. Оцінювання енергоефективності сучасних автопоїздів для міжнародних вантажних перевезень/Сучасні технології в машинобудуванні та транспорті. Науковий журнал. Луцьк: ЛНТУ, 2025. № 1(24). С. 355–366.

References

1. Abramov D. V., Podryhalo N. M., Podryhalo M. A., Polyansky O. S., Feist V. L. (eds. Podryhalo M. A., Polyansky O. S.) *Dynamic Properties and Stability of Operation of Automotive Transport Vehicles*. Kharkiv : KhNADU, 2014. 204 p.

2. Tarasov Yu. V. *Scientific Foundations for Ensuring the Technical Level of Road Transport Vehicles during Design and Modernization*: Author's Abstract of Doctoral Dissertation in Technical Sciences (05.22.02 – Automobiles and Tractors). Kharkiv, 2021. 40 p.

3. Potapov M. M. *Increasing the Efficiency of the Chassis Elements of AllWheelDrive Wheeled Transport Vehicles*: Author's Abstract of Candidate of Technical Sciences Dissertation (05.22.20 – Operation and Repair of Transport Means). Kharkiv, 2021. 20 p.

4. Omelchenko V. I. *Improving the Energy Efficiency of Vehicles by Increasing the Efficiency Coefficient of the Wheel Drive*. Qualification Manuscript for the Degree of Doctor of Philosophy in Specialty 274 "Automobile Transport". Kharkiv National Automobile and Highway University, Kharkiv, 2024.

5. Khabutdinov R. A. *A System Concept of EnergyResource Synergy and the Methodology of TechnologicalInnovative Management in Road Transport*. *Visnyk of the National Transport University. Series "Technical Sciences"*. ScientificTechnical Collection. Kyiv: NTU, 2020, Issue 1(46). DOI: 10.33744/230866452020146365374

6. Sakhno V. P., Tsymbal S. V., Polyakov V. M., Murovany I. S., Sharai S. M., Roy M. P. "Theoretical Principles for the Use of ThreeLink Road Trains for Freight Transportation". *VMT*, Issue 18 (2), pp. 155–167, Feb. 2024.

7. Prokudin H.S. *Issues of Organization, Management and Improving the Efficiency of Transport: Current State, Challenges, and Development Prospects*. Monograph edited by H. S. Prokudin and L. M. Savchuk. Dnipro : Porohy, 2021. 300 p.

8. Svirin D. O. *Improving the Efficiency of International Road Freight Transport in Logistics Chains*. Qualification Manuscript for the Degree of Candidate of Technical Sciences in Transportation Systems (05.22.01). National Transport University, Kyiv, 2021. 160 p.

9. Polyakov A. P., Grechanyuk M. S. "Analysis of Methods for Improving the Stability and Controllability of Freight Trucks with SemiTrailers". *Bulletin of Vinnytsia Polytechnic Institute*, No. 5, pp. 90–95, 2010.

10. Beherskyi D. B., Koval A. O. "The Influence of Geometric Parameters of a Road Train on Its Aerodynamic Characteristics". *Modern Technologies and Prospects for the Development of Road Transport*: Proceedings of the XV International ScientificPractical Conference, October 24–26, 2022. Zhytomyr: Zhytomyr Polytechnic, 2022, pp. 23–24.

11. Vikovych I. A. *Theory of Vehicle Motion*. Textbook approved by the Ministry of Education and Science of Ukraine. Lviv : Lviv Polytechnic Publishing, 2013. 672 p.

12. Hashchuk P. *Automobile: Wheel Drive Theory*. Kyiv : Kondor Publishing House, 2018. 328 p., 191 + 5 ill., 3 tables, Bibliography 39 titles.

13. Saaty T. L. *The Analytic Hierarchy Process: Planning, Priority Setting, Resource Allocation*. New York : McGrawHill International Book Co., 1980. 287 p.

14. Prykhodko V. E. "Assessment of the Energy Efficiency of Modern Road Trains for International Freight Transport". *Modern Technologies in Mechanical Engineering and Transport. Scientific Journal*. Lutsk : LNTU, 2025, No 1(24), pp. 355–366.