

ВИЗНАЧЕННЯ ІНТЕГРАЛЬНОГО ІНДЕКСУ ЕНЕРГЕТИЧНОЇ, ТРАНСПОРТНОЇ ТА ДОРОЖНЬОЇ ЕФЕКТИВНОСТІ АВТОПОЇЗДІВ ДЛЯ МІЖНАРОДНИХ ВАНТАЖНИХ ПЕРЕВЕЗЕНЬ

¹Національний університет «Львівська політехніка»

Запропоновано науково обґрунтовану експертно-функціональну модель оцінювання енергетичної, транспортної та дорожньої ефективностей функціонування одноканкових автопоїздів у контексті здійснення міжнародних вантажних перевезень коридорами транспортної мережі США та Україна — Європейський Союз. У межах дослідження здійснено декомпозицію функціонально-експлуатаційних характеристик на окремі групи чинників, які впливають на кожний вид ефективності. Такий підхід дозволив формалізувати складну систему показників, які визначають доцільність використання певних моделей автопоїздів в умовах транскордонних перевезень. Запропоновано побудову інтегрального індексу ефективності як зваженої лінійної комбінації основних конструкційно-експлуатаційних параметрів автопоїздів з урахуванням вагових коефіцієнтів, визначених за допомогою методу аналітичної ієрархії Т. Сааті. Такий підхід забезпечує об'єктивність і наукову обґрунтованість процесу ранжування технічних рішень та дозволяє врахувати різноманітність впливу окремих факторів. До уваги взято ключові параметри тягача і напівпричепа, такі як конструкційна маса, потужність двигуна, тип трансмісії, ємність паливної системи, навантаження на вісь, а також аеродинамічні характеристики, які суттєво впливають на енергетичну й транспортну ефективності. На основі запропонованої моделі проведено оцінювання низки сучасних автопоїздів європейського та північноамериканського виробництва, що дозволило визначити оптимальні конфігурації для міжнародних перевезень за критерієм комплексної ефективності. Результати дослідження можуть бути використані підприємствами транспортної галузі для формування автопарку, що відповідає вимогам енергоефективності, надійності та відповідності дорожньої інфраструктури. До того ж розроблену модель можна адаптувати до різних регіональних умов експлуатації, що свідчить про її універсальність і практичну цінність. Запропонований підхід також може бути інтегрований у системи підтримки прийняття рішень в логістиці, транспортному проектуванні та державному регулюванні транскордонного вантажного сполучення. Застосування результатів дослідження сприятиме підвищенню ефективності міжнародних транспортних операцій, зменшенню витрат пального та мінімізації негативного впливу на дорожню інфраструктуру.

Ключові слова: міжнародні перевезення, автопоїзд, шасі, трансмісія, ходова частина, системи керування, енергетична ефективність, транспортна ефективність, дорожня ефективність, метод, інтегральний показник.

Вступ

Актуальними є збільшення обсягів та економічної ефективності міжнародних вантажних автомобільних перевезень. Як свідчить зарубіжний досвід, якісного «стрибка» у транспортній сфері можна досягти тільки за рахунок використання нових технологій, пов'язаних із забезпеченням процесів міжнародних перевезень, що відповідають сучасним вимогам і міжнародним стандартам.

Міжнародні вантажні перевезення автомобільним транспортом, у порівнянні з іншими видами

транспорту, є одним з найефективніших та рентабельних видів перевезень вантажів не тільки близьких сполучень, але й на значних відстанях у зв'язку з побудовою швидкісних автобамів та застосуванням сучасних автопоїздів.

Ринок міжнародних вантажних перевезень автопоїздами транспортними коридорами Україна — ЄС значно зріс внаслідок розвитку альтернативних маршрутів постачання, які дали змогу забезпечити стабільність і надійність транспортування найрізноманітніших вантажів. Сьогодні відбувається постійне оновлення автопоїздів особливо великої місткості. Досвід вантажних перевезень показує, що для підвищення ефективності міжнародних автомобільних перевезень головний акцент зроблено на застосування автопоїздів збільшеної довжини, завантажувального об'єму та вантажності [1]. Необхідний відносно простий критерій, який може дати можливість оцінювати ефективність комплектації автопоїзда для виконання міжнародних вантажних перевезень. Поняття ефективності як показника результативності транспорту розглянуто та проаналізовано в [2]. У практиці дослідження ефективності автопоїздів розроблено велику кількість комплексних та узагальнених показників, які, зазвичай, дають змогу оцінювати окремі системи і складові автопоїзда. Проте проблема вибору автопоїзда для виконання відповідних перевезень за певних умов повинна зводитись до обґрунтованого однозначного рішення. Для цього доцільно мати відносно нескладну інтегральну оцінку ефективності.

Метою роботи є розробка концепції, побудова алгоритму та виведення експертно-функціональної залежності інтегрального показника ефективності одноланкового дизельного автопоїзда для виконання міжнародних вантажних перевезень залежно від ключових конструкційних параметрів автопоїзда, які, з погляду авторів, найістотніше впливають на його енергетичну, транспортну та дорожню ефективність.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Функціонування одноланкових автопоїздів для міжнародних вантажних перевезень характеризується: здатністю забезпечувати перевезення вантажів на далекі відстані; параметрами динаміки руху (пришвидження, максимальна швидкість, гальмівний шлях); прохідністю на різних дорожніх покриттях; надійністю і безпекою експлуатації та економічністю (витрата палива, технічне обслуговування).

Дослідження конструкційно-експлуатаційних чинників функціонування автопоїздів та їхньої ефективності для міжнародних вантажних перевезень висвітлено у працях: В. П. Волкова, П. М. Гащука, О. П. Кравченка, І. С. Мурованого, М. С. Олісевича, М. А. Подригала, В. М. Полякова, Г. С. Прокудіна, В. М. Придюка, Ю. В. Тарасова, В. П. Сахно та ін.

Зазвичай, до *головних конструкційних характеристик* одноланкового автопоїзда відносяться: повна, споряджена маса автопоїзда; габаритні розміри (довжина, ширина і висота); база і колісна формула; тип і потужність двигуна; трансмісія (тип, передавальні числа); підвіска (жорсткість, тип); гальмівна система; система керування; кліренс (дорожній просвіт); тип кузова і його конструкція.

Повна маса автопоїзда G_d (кг), яка визначає його вантажність, впливає на динамічні характеристики, габаритні розміри автопоїзда (довжина, ширина, висота) значно впливають на маневреність і прохідність, причому кліренс h (мм) впливає на геометричну прохідність, форма (мм) впливає на геометричну прохідність, форма кузова характеризує аеродинамічні властивості, колісна формула одноланкового автопоїзда та база визначають стійкість і прохідність, а підвіска і її жорсткість k (Н/м) впливає на плавність ходу [2]. Тип і потужність двигуна N_e (кВт) та передавальне число трансмісії U автопоїзда впливають на динаміку розгону одноланкового автопоїзда та на максимальну його швидкість руху $V_{\max}$ (км/год) [2]. Трансмісія забезпечує передачу потужності на колеса, а гальмівна система і система керування забезпечує керуваність та маневреність автопоїзда [2], [3].

У працях [4], [5] проаналізовано і визначено середню швидкість руху в конкретних умовах та їхню продуктивність як залежність від експлуатаційних характеристик автопоїзда. Динамічні моделі рухів одноланкових автопоїздів розглянуто і проаналізовано в [5], [7], [9], [10].

Результати досліджень міжнародних вантажних перевезень автопоїздами, зокрема з використанням математичного моделювання транспортних систем і технології підвищення ефективності перевезень викладено в [6], програмно-інструментальне забезпечення досліджень технічних параметрів автопоїздів розглянуто в [1]—[3]. Результати досліджень, які стосуються стійкості і

безпеки руху одно-, дво- і триланкових автопоїздів у міжнародному сполученні висвітлені в роботах [8]—[10], [12]. Динамічні процеси під час перевезення рідких вантажів розглянуто в [13].

Результати аналізу критеріїв ефективності міжнародних вантажних перевезень автопоїздами та досліджень критичних швидкостей стабільного руху автопоїздів викладені у працях [7], [8], [11], [14].

Конструкційні та експлуатаційні параметри автопоїздів пов'язуються з його функціональними характеристиками рівняннями руху, з урахуванням опорів їх рухові і динаміки руху. Функціональні характеристики автопоїздів розглядаються у сукупності взаємодії їхніх конструкційних і експлуатаційних параметрів. У цій теорії автомобіля автопоїзд розглядається, як багатофункціональний носій технічних ресурсів транспорту в транспортній операції щодо перевезення вантажів у міжнародному сполученні. Зазначено, що під час здійснення міжнародних вантажних автомобільних перевезень проявляються експлуатаційні властивості автотранспортних засобів (АТЗ), які варто враховувати у сукупності перевізного процесу.

У теорії енергоресурсної ефективності АТЗ враховуються зміни технічних параметрів нових автомобілів на основі модульного підходу за схемою *структурно-параметричної організації конструкції АТЗ* скорочено (СПОКА) [6]. Згідно зі схемою СПОКА процес переміщення автопоїзда з вантажем забезпечується роботою чотирьох основних пристроїв конструкції автомобіля та 14 функціонально-конструктивних модулів [6]. Технічний прогрес у заданому варіанті конструкції автопоїзда, враховується шляхом встановлення змін параметрів та характеристиками структури його функціональних модулів у порівнянні с минулими моделями автопоїзда.

1. Ключові конструкційні чинники енергетичної, транспортної та дорожньої ефективності одноланкового дизельного автопоїзда

Під інтегральним індексом ефективності автопоїзда, ми розуміємо дійсне число, яке визначається лінійною комбінацією ключових конструкційних і експлуатаційних чинників автопоїзда, що впливають на енергетичну, транспортну та дорожню ефективності з ваговими коефіцієнтами. Вагові коефіцієнти визначаються методом аналітичної ієрархії Т. Сааті [15]. Найефективнішим вважається автопоїзд, інтегральний індекс ефективності якого набуває найбільшого значення.

Визначення ключових чинників автопоїзда, які впливають на енергетичну, транспортну та дорожню ефективності одноланкового автопоїзда (тягач + причіп) для виконання міжнародних вантажних перевезень здійснено на основі аналізу функціонально-конструктивних модулів автопоїзда [6].

Енергетична ефективність автопоїзда для міжнародних вантажних перевезень є показником, який відображає здатність автопоїзда ефективно використовувати енергетичні ресурси (паливо, електроенергію тощо) для виконання транспортних завдань з мінімальними витратами.

Чинники розподілу енергії в одноланковому автопоїзді, які характеризують роботу двигуна та трансмісії, включають:

T — крутний момент двигуна (н·м);	η — коефіцієнт корисної дії двигуна (безрозмірний);
m — маса двигуна (кг);	η_{tr} — коефіцієнт корисної дії трансмісії (безрозмірний);
I — момент інерції двигуна (кг·м ²);	L_{tr} — сумарні втрати потужності в трансмісії (Вт або
ω — кутова швидкість двигуна (рад/с);	безрозмірна величина, що відображає відносні
α — кутове прискорення двигуна (рад/с ²);	втрати)

Аналіз впливу цих чинників на ефективність функціонування автопоїзда розглянуто в [16].

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

Результати аналізу функціонально-конструктивних модулів транспортної ефективності *одноланкового автопоїзда* (тягач + причіп) та виокремлення ключових конструкційних чинників подано в табл. 1, де вказано напрямок монотонної зміни показника (зростання або спадання), який викликає підвищення ефективності автопоїзда.

Дорожня ефективність автопоїзда в міжнародних вантажних перевезеннях — це показник, який відображає здатність автопоїзда ефективно виконувати перевезення з мінімальними витратами ресурсів (палива, часу, фінансів) за максимальної продуктивності. Вона враховує

технічні, економічні та організаційні аспекти процесу перевезення.

Таблиця 1

Ключові конструкційні чинники транспортної ефективності

Позначення	Показники	Модуль (КМ)	Напрямок зміни для підвищення ефективності	Коментар
P_v	вантажопідйомність (макс. маса вантажу)	КМ 2.1 (кузов)	зростання	збільшує корисну транспортну роботу
m_k	маса порожнього кузова	КМ 2.1 (кузов)	спадання	зменшує власну вагу автопоїзда
J_p	жорсткість рами	КМ 2.2 (рама)	зростання	підвищує міцність і довговічність
f	коефіцієнт опору коченню	КМ 2.4 (ходові модулі)	спадання	знижує енергетичні втрати
R_t	ресурс шин	КМ 2.4 (ходові модулі)	зростання	зменшує експлуатаційні витрати

Результати аналізу функціонально-конструктивних модулів дорожньої ефективності *одноланкового автопоїзда* (тягач + причіп) та виокремлення ключових конструкційних чинників подано в табл. 2. Вказано напрямок монотонної зміни показника (зростання або спадання), який викликає підвищення ефективності автопоїзда.

Таблиця 2

Ключові конструкційні чинники дорожньої ефективності

Позначення	Показник	Елемент ходової частини	Напрямок зміни для підвищення ефективності	Коментар
K_{ss}	жорсткість підвіски	підвіска	оптимальне зростання	підвищує плавність руху та стійкість
H_{st}	хід підвіски (амплітуда коливань)	підвіска	зростання	поліпшує адаптацію до нерівностей дороги
D_k	діаметр коліс	колеса та шини	оптимальне зростання	впливає на прохідність і швидкість
C_a	зчіпні властивості шин	колеса та шини	зростання	підвищує безпеку руху

2. Алгоритм методу аналітичної ієрархії Т. Сааті: Основні етапи

На *першому* етапі виконується структуризація конструкційних чинників у вигляді ієрархічної структури. Множина чинників ефективності автопоїзда декомпонується на простіші складові й подається у вигляді ієрархії. Інтегральний показник ефективності одноланкового автопоїзда записуємо у формі:

$$E = w_1 \left(w_{11} \frac{T}{m} + w_{12} \frac{\eta \omega}{I} - w_{13} a + w_{14} \eta_{tr} - w_{15} L_{tr} \right) + w_2 \left(w_{21} P_v - w_{22} m_k + w_{23} J_p - w_{24} f + w_{25} R_t \right) + w_3 \left(w_{31} K_{ss} + w_{32} H_{st} + w_{33} D_k + w_{34} C_a \right). \quad (1)$$

де w_i , w_{ij} — вагові коефіцієнти при нормованих конструкційних чинниках енергетичної, транспортної та дорожньої ефективності. Формула нормування

$$[x] = (x - x_{\min}) / (x_{\max} - x_{\min}). \quad (2)$$

На *другому* етапі будемо матрицю попарних порівнянь енергетичної, транспортної та дорожньої ефективностей та матриці порівнянь чинників кожного з трьох рівнів.

Для кожної групи елементів одного рівня (наприклад, критеріїв відносно мети чи альтернатив відносно кожного критерію) проводяться попарні порівняння за шкалою Сааті (від 1 до 9 або їхніх обернених значень). Результати заносяться у квадратні матриці парних порівнянь, де кожен елемент порівнюється з усіма іншими.

На *третьому* етапі обчислюються вагові коефіцієнти та виконується перевірка узгодженості.

На основі матриць парних порівнянь розраховуються вагові коефіцієнти (пріоритети) для кожного елемента.

Важливим етапом є *перевірка узгодженості* оцінок експертів (наприклад, за допомогою індек-

су узгодженості), щоб уникнути суперечливих рішень.

Індекс узгодженості (CI)

$$CI = (\lambda_m ax - n) / (n - 1), \quad (3)$$

Відношення узгодженості (CR)

$$CR = CI / RI, \quad (4)$$

де випадковий індекс узгодженості $RI = 0,58$, коли розмірність матриці порівнянь $n = 3$; $RI = 0,90$, коли $n = 4$; $RI = 1,12$, коли $n = 5$ [15]. Матриця попарних порівнянь вважається добре узгодженою, якщо $CR \leq 0,1$.

3. Методика формування ієрархічної моделі та визначення вагових коефіцієнтів

3.1. Побудова ієрархічної структури

Задача декомпозиції чинників на простіші складові подається у вигляді ієрархії.

Рівень 1 (Ціль): Інтегральний показник ефективності E

Рівень 2 (Критерії):

Тягово-енергетичні параметри (C_1); Транспортна ефективність (C_2); Дорожня ефективність (C_3).

Рівень 3 (Параметри):

Для кожного критерію виділяємо такі ключові параметри:

$$C_1 : \frac{T}{m}; \left(\frac{\eta \cdot \omega}{I} \right); a; \eta_{tr}; L_{tr}. \quad C_2 : P_v; m_k; J_p; f; R_t. \quad C_3 : K_{ss}; H_{st}; D_k; C_\alpha.$$

3.2. Побудова матриці парних порівнянь енергетичної, транспортної та дорожньої ефективностей та матриці парних порівнянь критеріїв рівня 2.

На основі даних матриці парних порівнянь енергетичної, транспортної та дорожньої ефективностей розраховуємо ваги w_1, w_2, w_3

$$w_1 = 0,57; \quad w_2 = 0,29; \quad w_3 = 0,14.$$

3.3. Підкритерії $w_1 \left(\frac{T}{m}, \frac{\eta \cdot \omega}{I}, \alpha, \eta_{tr}, L_{tr} \right)$

Вважаємо, що підкритерій $\frac{T}{m}$ — основний, $\frac{\eta \cdot \omega}{I}$ і η_{tr} — менше впливає, α і L_{tr} — найменше впливають на значення інтегрального індексу. Ці припущення дозволяють побудувати відповідну матрицю порівнянь та обчислити вагові коефіцієнти

$$w_{11} \frac{T}{m} = 0,37; \quad w_{12} \left(\frac{\eta \cdot \omega}{I} \right) = 0,22; \quad w_{13}(\alpha) = 0,11; \quad w_{14}(\eta_{tr}) = 0,22.$$

3.4. Для підкритеріїв $w_2(P_v, m_k, J_p, f, R_t)$, у припущенні, що P_v — основний, J_p і R_t — другорядні, m_k і f — впливають найменше, отримаємо

$$w_{21}(P_v) = 0,37; \quad w_{22}(m_k) = 0,11; \quad w_{23}(J_p) = 0,21; \quad w_{24}(f) = 0,11; \quad w_{25}(R_t) = 0,21.$$

Для підкритеріїв $w_3(K_{ss}, H_{st}, D_k, C_\alpha)$, у припущенні, що H_{st} — основний, K_{ss} і D_k — другорядні, а C_α — впливає найменше, отримаємо

$$w_{31}(K_{ss}) = 0,28; \quad w_{32}(H_{st}) = 0,47; \quad w_{33}(D_k) = 0,16; \quad w_{34}(C_\alpha) = 0,10.$$

3.5. Перевірка узгодженості матриць попарних порівнянь

Для кожної з чотирьох матриць попарних порівнянь розраховані: індекси узгодженості та відношення узгодженості (CR).

Усі чотири матриці мають відношення узгодженості $CR \leq 0,1$, що свідчить про добру узгодженість експертних оцінок. Вагові коефіцієнти, отримані на їхній основі, є надійними для подаль-

шого розрахунку інтегрального показника ефективності.

Інтегральний показник ефективності одноланкового автопоїзда (тягач+причіп) для виконання міжнародних вантажних перевезень з урахуванням усіх його найважливіших параметрів, зокрема матриці парних порівнянь для критеріїв, подано у такому вигляді:

$$E = 0,2109 \frac{T}{m} + 0,1254 \left(\frac{\eta \omega}{I} \right) - \alpha + 0,1254 \eta_{tr} - 0,0456 L_{tr} + 0,1073 P_v - 0,0319 m_k + 0,0609 J_p - 0,0319 f + 0,0609 R_t + 0,0392 K_{ss} + 0,0658 H_{st} + 0,0224 D_k + 0,0140 C_\alpha, \quad (5)$$

де T — крутний момент двигуна (Н·м); m — маса двигуна (кг); I — момент інерції двигуна (кг·м²); ω — кутова швидкість двигуна (рад/с); α — кутове прискорення двигуна (рад/с²); 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_k — маса порожнього кузова; J_p — жорсткість рами; f — коефіцієнт опору коченню; R_t — ресурс шини (англ.: tyre); K_{ss} — жорсткість підвіски (англ.: stiffness of the suspension); H_{st} — хід підвіски (англ.: suspension travel); D_k — діаметр колеса; C_α — коефіцієнт зчеплення (англ.: adhesion coefficient).

4. Застосування інтегрального показника

Розрахуємо E для Freightliner Cascadia 2023 та Volvo FM на основі використання нормованих значень (табл. 3).

Таблиця 3

Нормовані значення ключових параметрів Freightliner Cascadia 2023 та Volvo FM

Позначення	Freightliner Cascadia 2023			Volvo FM		
	Конкретне значення (x)	Діапазон (x _{min} —x _{max})	Нормоване значення (N)	Конкретне значення (x)	Діапазон (x _{min} —x _{max})	Нормоване значення (N)
T	2643,5 Н·м	1500...2800	0,8796	1750 Н·м	1600...2500	0,167
m	1350 кг	1000...1600	−0,5833	1200 кг	900...1300	−0,75
I	20 кг·м ²	5...40	0,4286	18 кг·м ²	10...30	0,4
ω	209 рад/с	0...300	0,6967	95 рад/с	90...314	0,022
α	100 рад/с ²	−100...300	0,5	0,40	0,40...0,45	0
η	0,425	0,35...0,50	0,5	0,85	0,85...0,96	0
η_{tr}	0,925	0,85...0,97	0,625	0,15	0,04...0,15	−1,0
L_{tr}	0,10	0,05...0,20	−0,3333	20000 кг	20000...120000	0
P_v	26000 кг	20000...30000	0,6	7500 кг	7000...9000	−0,25
m_k	8200 кг	7000...9000	−0,6	0,78	0,6...0,9	0,6
J_p	827 МПа	700...900	0,635	0,012	0,006...0,012	−1,0
f	0,008	0,005...0,015	−0,3	0,85	0,7...1,0	0,5
R_t	100000 км	60000...150000	0,4444	0,65	0,5...0,8	0,5
K_{ss}	100000 Н/м	30000...200000	0,4118	0,22	0,15...0,25	0,7
H_{st}	200 мм	100...300	0,5	0,88	0,8...1,1	0,267
D_k	1,0 м	0,9...1,1	0,5	0,75	0,7...0,85	0,333
C_α	0,775	0,6...0,9	0,5833	1750 Н·м	1600...2500	0,167

Підставляємо у формулу (1) нормовані числові значення параметрів, поданих в табл. 3.

Отримуємо загальні інтегральні показники

$$E_{Fr} = 0,5377; \quad E_{Volvo} = 0,264;$$

Отже, Freightliner Cascadia 2023 має значно вищий інтегральний показник ефективності і є кращою альтернативою за результатами МАІ.

За цим критерієм Freightliner Cascadia демонструє вищу ефективність порівняно з Volvo FM. Ця перевага обумовлена:

Оптимізацією трансмісії — вищий ККД трансмісії та меншими втратами потужності.

Поліпшеними характеристиками двигуна — вища кутова швидкість та кращий коефіцієнт корисної дії.

Вантажністю та ресурсом шин, що позитивно впливає на другий компонент формули.

Деталі параметрів:

Крутний момент, де обидві моделі мають однакове значення T , проте Freightliner компенсує більшу масу двигуна за рахунок ефективнішого використання потужності.

Аеродинаміка Freightliner має вдосконалену конструкцію, яка зменшує опір повітря, що непрямо враховано в нормалізованих параметрах.

Ці розрахунки підтверджуються технічними даними з офіційних джерел виробників автопоїздів.

Висновки

Розроблено та обґрунтовано математичну модель визначення інтегрального чинника ефективності одноланкових автопоїздів з пневматичною підвіскою для виконання міжнародних вантажних перевезень.

Запропоновано *удосконалений метод визначення ефективності* одноланкових автопоїздів як лінійної комбінації ключових, узагальнених та комплексних чинників одноланкових автопоїздів.

Отримано кількісну оцінку інтегрального чинника ефективності одноланкових автопоїздів для міжнародних вантажних перевезень та обґрунтовано її методом аналітичної ієрархії Т. Сааті.

У статті проаналізовано вплив тільки незначної кількості чинників енергетичної, транспортної та дорожньої ефективності автопоїзда. Наприклад, на ефективність автопоїзда під час виконання міжнародних вантажних перевезень істотно впливають характеристики кермової системи, гальмівної системи, колісного тягового модуля тощо. Вплив цих та інших важливих чинників для підвищення ефективності автопоїзда під час виконання міжнародних вантажних перевезень транспортними коридорами мережі Україна — ЄС з урахуванням досвіду міжнародних перевезень у США автори вивчатимуть у подальших дослідженнях, де головний акцент надаватиметься оцінюванню економічної ефективності міжнародних вантажних перевезень автопоїздів.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

- [1] М. С. Олісевич, *Організація автомобільних перевезень. Вантажні перевезення*, ч. 1. Львів: НУЛП, 2017, 336 с.
- [2] Д. В. Абрамов, Н. М. Подригало, М. А. Подригало, О. С. Полянський, і В. Л. Файст, *Динамічні властивості і стабільність функціонування автотранспортних засобів*, за ред. М. А. Подригала, О. С. Полянського. Харків: ХНАДУ, 2014, 204 с.
- [3] Ю. В. Тарасов, «Наукові основи забезпечення технічного рівня автотранспортних засобів при проектуванні та модернізації.» автореф. дис. д-ра техн. наук, спец. 05.22.02 — автомобілі та трактори. Харків, 2021, 40 с.
- [4] М. М. Потапов, «Підвищення ефективності функціонування елементів шасі повнопривідних колісних засобів транспорту.» автореф. дис. канд. техн. наук, спец. 05.22.20 — експлуатація та ремонт засобів транспорту. Харків, 2021, 20 с.
- [5] В. І. Омельченко, «Поліпшення енергоефективності транспортних засобів шляхом підвищення коефіцієнта корисної дії колісного рушія.» дис. канд. техн. наук, спец. 274 — автомобільний транспорт. Харків: ХНАДУ, 2024.
- [6] Р. А. Хабутдінов, «Системна концепція енергоресурсної синергії та методологія технологічно-інноваційного управління на автотранспорті,» *Вісник національного транспортного університету. Серія "Технічні науки"*, вип. 1(46), с. 365-374, 2020. <https://doi.org/10.33744/2308-6645-2020-1-46>.
- [7] 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 виконання перевезень вантажів», *Вісник машинобудування та транспорту*, № 18, № 2, с. 155-167, 2024.
- [8] В. П. Онищук, «Забезпечення стійкості автопоїзда для перевезення контейнерів.» дис. канд. техн. наук, спец. 05.22.02. Львів, 2012, 162 с.
- [9] А. П. Поляков, і М. С. Гречанюк, «Аналіз шляхів підвищення стійкості та керованості вантажних автомобілів з напівпричепами», *Вісник Вінницького політехнічного інституту*, № 5, с. 90-95, 2010.
- [10] О. М. Пилипенко, О. В. Батраченко, і І. М. Литовченко, «Моделювання аеродинаміки сидельного автопотягу», *Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки*, № 2, с. 27-33, 2017.
- [11] Г. С. Прокудін, і Л. М. Савчук (ред.), *Проблеми організації, управління та підвищення ефективності перевезень: стан, проблеми, перспективи розвитку*. Дніпро, Україна: Пороги, 2021, 300 с.
- [12] І. А. Вікович, *Теорія руху транспортних засобів*. Львів, Україна: Вид-во НУ «Львівська політехніка», 2013, 672 с.
- [13] М. Ф. Дмитриченко, і І. А. Вікович, *Динаміка мобільних машин з начіпними функціональними елементами*. Львів, Україна: Вид-во НУ «Львівська політехніка», 2008, 496 с.
- [14] П. Гашук, *Автомобіль: Теорія колісного рушія*. Київ, Україна: Видавничий дім «Кондор», 2018, 328 с.
- [15] T. L. Saaty, *The Analytic Hierarchy Process: Planning, Priority Setting, Resource Allocation*. New York: McGraw-Hill International Book Co., 1980, 287 p.
- [16] В. Е. Приходько, «Оцінювання енергоефективності сучасних автопоїздів для міжнародних вантажних перевезень», *Сучасні технології в машинобудуванні та транспорті*, № 1 (24), с. 355-366, Луцьк, Україна: ЛНТУ, 2025.

Рекомендована кафедрою автомобілів та транспортного менеджменту ВНТУ

Стаття надійшла до редакції 23.07.2025

Вікович Ігор Андрійович — д-р техн. наук, професор, професор кафедри транспортних технологій, e-mail: wиковigor@gmail.com ;

Приходько Всеволод Едуардович — аспірант кафедри транспортних технологій, e-mail: prykhodkovsevolod@gmail.com .

Національний університет «Львівська політехніка», Львів

I. A. Vikovych¹**V. E. Prykhodko¹**

Construction of an Integral Efficiency Index for Energy, Transport, and Road Performance of Road Trains in International Freight Transport

¹Lviv Polytechnic National University

The article presents a scientifically grounded expert-functional model for assessing the energy, transport, and road efficiency of single-link road trains used in international freight transportation along the transport corridors of the USA and Ukraine–European union. Within the research framework, a decomposition of functional and operational characteristics into separate groups of factors affecting each type of efficiency has been carried out. This approach made it possible to formalize the complex system of indicators that determine the feasibility of using certain road train models under cross-border transportation conditions.

An integral efficiency index is proposed in the form of a weighted linear combination of key design and operational parameters of road trains, taking into account weighting coefficients determined using the analytic hierarchy process by T. Saaty.

This approach ensures objectivity and scientific justification for the ranking of technical solutions and allows for considering the heterogeneous impact of various factors. Key parameters of the tractor and semi-trailer were considered, such as structural weight, engine power, transmission type, fuel system capacity, axle load, and aerodynamic characteristics, which significantly affect energy and transport efficiency.

Based on the proposed model, the assessment was carried out for several modern road trains of European and North American production, enabling the identification of optimal configurations for international transportation based on the criterion of comprehensive efficiency. The research results can be used by the transport enterprises for the formation of vehicle fleets that meet the requirements of energy efficiency, reliability, and compatibility with road infrastructure. Moreover, the developed model can be adapted to different regional operating conditions, demonstrating its versatility and practical value.

The proposed approach can also be integrated into decision-support systems in logistics, transport planning, and public regulation of cross-border freight traffic. The application of the research findings will contribute to improving the efficiency of international transport operations, reducing fuel consumption, and minimizing the negative impact on road infrastructure.

Keywords: international transportation, road train, chassis, transmission, running gear, control systems, energy efficiency, transport efficiency, road efficiency, method, integral indicator.

Vikovych Ihor A. — Dr. Sc. (Eng.), Professor, Professor of the Chair of Transport Technologies, e-mail: wиковigor@gmail.com ;

Prykhodko Vsevolod E. — Post-Graduate Student of the Chair of Transport Technologies, e-mail: prykhodkovsevolod@gmail.com