

Приходько В.Е.
Національний університет «Львівська політехніка»

ОЦІНЮВАННЯ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ СУЧАСНИХ АВТОПОЇЗДІВ ДЛЯ МІЖНАРОДНИХ ВАНТАЖНИХ ПЕРЕВЕЗЕНЬ

У роботі запропоновано оригінальну процедуру моделювання та вдосконалену методику статистичного оцінювання параметрів, що характеризують ефективність функціонування енергетичної системи “двигун – трансмісія” сучасних автопоїздів **Volvo FM** і **Freightliner Cascadia**, які виконують міжнародні вантажні перевезення із застосуванням дизельних двигунів Volvo D13 і Detroit DD15. Методика побудована з урахуванням актуальних міжнародних нормативних вимог до транспортування вантажів, зокрема щодо екологічності, паливної ефективності, стабільності технічних характеристик і економічності доцільності перевезень.

Оцінювання ефективності системи “двигун – трансмісія” базується на комплексному аналізі факторів впливу, що дозволяє глибше дослідити взаємозв'язок між параметрами роботи транспортного засобу та витратами енергії під час експлуатації на міжнародних маршрутах. Для цього використано метод аналітичної ієрархії та адаптовані статистичні інструменти, що забезпечують обґрунтованість висновків і придатність методики до практичного застосування. Особливу увагу приділено ідентифікації найбільш значущих факторів, які впливають на загальну енергоефективність автопоїздів.

Теоретичну основу дослідження склали праці провідних вчених у галузі транспортних технологій і логістики, серед яких: Ігор Вікович, Володимир Волков, Петро Гашук, Георгій Прокудін, Анатолій Лебедев, Ігор Мурований, Володимир Сахно, Михайло Подригало, Рамазан Хабутдінов та ін. Запропоновані результати можуть бути корисними для підвищення ефективності міжнародних вантажних перевезень, зниження витрат пального та вдосконалення технічної політики автотранспортних підприємств.

Ключові слова: автопоїзд, дизельний двигун, трансмісія, енергоефективність, міжнародні перевезення, вантажі, метод аналітичної ієрархії.

ВСТУП

Однією з основних задач логістичного забезпечення міжнародних автомобільних перевезень є вибір виду транспорту, розробка маршруту руху, вибір рухомого складу, підготовка вантажів до перевезення, документальне забезпечення на усіх етапах доставки, контроль за якістю сервісу та дотриманням регламенту виконання робіт тощо [1]. На сучасному етапі розвитку світового ринку автотранспортних засобів (АТЗ), зокрема автопоїздів для міжнародних, зростає різноманіття запропонованих видів та різновидів їх конструкцій. Тому при обґрунтуванні або оновленні парку рухомого складу підприємства, які здійснюють міжнародні перевезення вантажів автопоїздами, перевізники можуть висувати до вибору автопоїздів вимоги щодо їх ефективності. Проте, на сьогодні немає комплексного підходу щодо енергетичної оцінки ефективності сучасних автопоїздів, які здійснюють міжнародні перевезення вантажів.

Найскладнішим і найважливішим агрегатом, від стану якого залежать багато технічних і економічних показників функціонування автопоїздів, є двигун.

Розрізняють детерміновані, статистичні (стохастичні), імітаційні та експертно-функціональні моделі системи системи “двигун – трансмісія”.

Детерміновані математичні моделі дизельного двигуна автопоїзда як джерела механічної енергії базуються на системах диференціальних рівнянь, що враховують термодинамічні, механічні та гідравлічні процеси [2]. Наприклад, математична модель двигуна як джерела механічної енергії має такий загальний вигляд [3]:

$$\frac{d\omega_{\varepsilon}}{dt} = f_1(M_{\varepsilon}, M_{mp}) \quad (1)$$

$$\frac{dg_{\varepsilon}}{dt} = f_2(M_{\varepsilon}, M_{mp}) \quad (2)$$

де M_{ε} – ефективний крутний момент від газів двигуна, що є функцією кутової швидкості валу, подачі палива та часу; M_{mp} – момент опору трансмісії, що не залежить від двигуна.

Для дослідження динаміки руху автопоїзда можна застосувати таку математичну модель:

$$J_d \frac{d\omega_{\varepsilon}}{dt} = M_{\varepsilon} - M_{mp} \quad (3)$$

J_d – зведений момент інерції двигуна [3].

У цій моделі момент опору трансмісії $M_{тр}$ визначається аналітично або експериментально як функція параметрів трансмісії, рушія та опорної поверхні, що змінюється в часі. Ефективний момент двигуна M_e є функцією параметрів самого двигуна та параметра керування подачею палива α_k :

$$M_e = \Phi_3(\omega_e, \alpha_k, t)$$

Однак, системи диференціальних рівнянь (1-3) задовільно описують лише якісну картину характеристик розв'язків диференціальних рівнянь, що недостатньо для визначення ефективності функціонування системи "двигун-трансмісія".

Функціонування системи "двигун-трансмісія" дизельного автопоїзда можна також характеризувати випадковими процесами (наприклад, випадкові коливання крутного моменту, швидкості, навантаження), записавши інтегральні рівняння випадкових процесів у вигляді лінійних інтегральних рівнянь Фредгольма.

Позначимо:

$Q(t)$ — випадковий процес теплової енергії, що утворюється в дизельному двигуні в часі t ,

$M(t)$ — випадковий процес механічної енергії, що передається на трансмісію,

$T(t)$ — випадковий процес механічної енергії, що подається на півосі коліс.

Тоді загальна схема перетворення теплової енергії у механічну та передачі її трансмісією може бути описана інтегральними рівняннями виду:

$$M(t) = \int_0^t K_1(t, \tau) Q(\tau) d\tau + \eta_1(t)$$

$$T(t) = \int_0^t K_2(t, \tau) M(\tau) d\tau + \eta_2(t)$$

де: $K_1(t, \tau)$, $K_2(t, \tau)$ — інтегральні ядра, що характеризують динаміку перетворення енергії в двигуні та трансмісії відповідно,

- $\eta_1(t)$, $\eta_2(t)$ — випадкові шумові процеси, що моделюють флуктуації та невизначеності у процесах перетворення і передачі енергії.

Фактори, що визначають ці процеси - перетворення теплової енергії у механічну і передачу механічної енергії трансмісією до рушія автопоїзда.

Перетворення теплової енергії у механічну: температурний режим камери згоряння; якість палива та режим його подачі; тиск і об'єм робочої суміші; теплопровідність і тепловіддача деталей двигуна; вібрації та механічні коливання деталей двигуна; випадкові флуктуації процесу згоряння (нестабільність горіння).

Передачу механічної енергії трансмісією до рушія автопоїзда: механічні втрати на тертя; динамічні навантаження та удари; еластичність та деформації деталей трансмісії; знос і технічний стан вузлів трансмісії; випадкові коливання навантаження на колеса.

Комбінації факторів, що характеризують випадкові процеси "двигун-трансмісія": комбінація температурних коливань і нестабільності згоряння визначає випадкові флуктуації теплової енергії $Q(t)$; взаємодія механічних коливань двигуна і динамічних навантажень трансмісії формує випадковий процес $M(t)$; залежність між зносом трансмісії і змінними навантаженнями на колеса визначає випадковий процес $T(t)$.

Можна також використовувати інтегро-диференціальні рівняння випадкових процесів у вигляді лінійних інтегральних рівнянь Фредгольма або Вольтерри. Переваги використання інтегро-диференціальних рівнянь для моделювання систем "двигун-трансмісія" полягають у такому:

- інтегральні члени в рівняннях дають змогу враховувати вплив попередніх станів системи на поточний стан, що важливо для опису складної взаємодії між двигуном і трансмісією;
- інтегро-диференціальні рівняння дають змогу описувати як миттєві зміни (через похідні), так і накопичені ефекти (через інтеграли), що характерно для реальних технічних систем;
- такі рівняння легко розширюються до стохастичних моделей, що дозволяє моделювати випадкові процеси, властиві роботі двигуна і трансмісії в реальних умовах експлуатації;
- завдяки комплексному опису динаміки системи інтегро-диференціальні рівняння забезпечують більш точніше прогнозування поведінки системи при різних режимах роботи.

Незважаючи на те, що інтегро-диференціальні рівняння є потужним інструментом для комплексного і точного моделювання систем "двигун-трансмісія", який враховує як динамічні, так і

стохастичні аспекти їх роботи, застосування їх пов'язане з великою кількістю складних експериментів, неспівмірною із задекларованою у статті проблемою.

Для аналізу енергоефективності автопоїздів рекомендуються імітаційні моделі в середовищах типу MATLAB Simulink, які інтегрують динамічні рівняння двигуна, трансмісії та зовнішніх умов.

Імітаційна модель дизельного двигуна на основі фізичних, напівфізичних, математичних та термодинамічних рівнянь дає змогу проводити прогнозне моделювання функціонування двигуна [4].

Уся система двигуна розділена на кілька функціональних блоків: охолодження, змащення, утворення паливноповітряної суміші, впорскування, згоряння та викиди. Підмоделі та динамічні характеристики окремих блоків встановлюються за принципами роботи двигуна, рівняннями та експериментальними даними, зібраними на стенді випробувань дизельних та бензинових двигунів. Загальна динаміка системи двигуна внутрішнього згоряння виражається у вигляді набору одночасних алгебраїчних і диференціальних рівнянь з використанням підблоків і S-функцій Matlab/Simulink. Моделювання цієї моделі, реалізоване на Matlab/Simulink, може бути використане для отримання продуктивності роботи двигуна, тиску, температури, ефективності, виділення тепла, кута кривошипа, швидкості витрати палива, викидів на різних підблоках. Однак, для досягнення цілей статті, процес визначення ефективності автопоїзда є також дуже складний.

На нашу думку, оцінювання енергоефективності системи “двигун – трансмісія” сучасних дизельних автопоїздів достатньо провести, використавши експертно-функціональну модель дослідження процесу функціонування цієї системи.

АНАЛІЗ ЛІТЕРАТУРНИХ ДАНИХ ТА ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМИ

Серед відомих системно описаних підходів оцінювання автомобілів та автопоїздів, що можуть використовуватися при виконанні міжнародних вантажних перевезень виділяють підходи що відповідають критеріям енергоефективності [5, 6, 7].

У кандидатській дисертації [7] Гальона І. І. сформулювала та розв'язала задачу, яка полягала у розробці, адаптації та застосуванні експлуатаційно-технологічного підходу, який би забезпечив енергозберігаючі технології при обґрунтуванні автомобіля на задані умови експлуатації. Даний підхід базувався на принципах теорії енергоресурсної ефективності автомобіля узагальненого типу, що розроблена в працях проф. Хабутдінова Р.А. [5, 6]. Для оцінки автомобіля як носія технічних ресурсів транспорту у цій теорії використовувалися:

- енергетична схема перетворення технологічних ресурсів транспорту в фізичний продукт;
- технологічна схема взаємозаміщення багатофункціонального автотранспортного засобу (АТЗ) як носія автономних технічних ресурсів транспорту (АНРТ) у транспортній операції;
- математичні моделі для аналізу енергоресурсної ефективності узагальненого типу (зі змінною структурно-параметричною організацією).

У теорії енергоресурсної ефективності розглядався автомобіль як носій технічних ресурсів транспорту, що має вісім властивостей. Головними властивостями, які мають важливе значення для виконання транспортних операцій та забезпечення адаптивного функціонування АТЗ є такі, як: складна машина, небезпечний об'єкт керування, перевізний засіб, знаряддя технологічних машинних впливів (машинні процедури) та конструктивно-технологічна основа процесу перетворення ресурсів.

В енергетичній схемі перетворення технологічних ресурсів транспорту у фізичний продукт, ресурси поділяються на технічні, енергетичні, трудові та фізичні.

При об'єднанні технологічних і режимних ресурсів отримуємо виробничі ресурси під час використання яких у процесі перетворення енергії формуються енерговитрати на переміщення експлуатаційної маси. Потім енерговитрати перетворюються у фізичний продукт, тобто керовані імпульси кількості руху автомобіля. Частина цих імпульсів являє собою транспортну роботу з перевезення вантажів.

У теорії енергоресурсної ефективності АТЗ нами враховувалися зміни технічних параметрів нових автомобілів на основі модульного підходу за схемою структурно-параметричної організації конструкції АТЗ.

У сукупності компоненти, які визначають енергоефективність дизельного автопоїзда система "двигун - трансмісія" є базовою, оскільки вона прямо впливає на перетворення енергії, визначає режими роботи в різних умовах руху, істотно впливає на витрати палива, визначає динаміку та швидкість автопоїзда.

Прямий вплив на перетворення енергії реалізовується тим, що дизельний двигун перетворює хімічну енергію палива в механічну, а трансмісія передає цю енергію на ведучі колеса автопоїзда. Ефективність кожного з цих процесів визначає кінцеву енергоефективність автопоїзда.

Визначення режиму роботи системи важливе тому, що оптимальний вибір передачі дозволяє двигуну працювати в зоні максимального ККД. Система "двигун - трансмісія" визначає, як ефективно використовується потужність двигуна в різних умовах руху автопоїзда.

Ключовий вплив на витрату палива пояснюється тим, що характеристики двигуна (питома витрата палива, крутний момент) та ефективність трансмісії безпосередньо впливають на обсяг спожитого палива.

Співвідношення крутного моменту і швидкості руху автопоїзда, що забезпечується трансмісією, визначає розгінні характеристики та можливість підтримувати оптимальну швидкість руху, тобто, система визначає динаміку та швидкість руху автопоїзда.

Загалом система "двигун - трансмісія" визначає поведінку функціонування автопоїзда:

- ведучих коліс (швидкість обертання, крутний момент, тягові зусилля автопоїзда).
 - трансмісійного валу (карданного валу/півосей): навантаження, швидкість обертання, крутний момент.
 - головної передачі та диференціалу: передавальне число, розподіл крутного моменту.
- Важливо відмітити, що система "двигун - трансмісія" також впливає на:
- зношення шин (залежить від режиму розгону та гальмування).
 - ресурс гальмівної системи (моторне гальмування розвантажує гальма).
 - комфорт водія (зручність управління, шум, вібрація).

Ефективність системи "двигун-трансмісія" вивчалась багатьма дослідниками, які зробили відповідний внесок в оптимізацію управління енергією в автомобілях, що включає ефективне використання двигуна та трансмісії. Також, значний внесок зробили інженери та науковці компаній Volvo та Freightliner, постійно вдосконалюючи свої системи "двигун-трансмісія" для досягнення більшої ефективності та економії палива.

У доступних нам публікаціях використовувались декілька методів щодо прийняття управлінського рішення з вибору ефективного автомобіля. Аналіз багатофакторних критеріїв та зведення багатофакторної задачі до однофакторної здійснювалися такими методами:

– метод матричного моделювання [8], де чинники процесу перевезення упорядковуються у матричному вигляді, що дозволяє подати взаємозв'язки між ресурсами та витратами у вигляді блоків матриці. Під інтегральним коефіцієнтом ефективності запропоновано розуміти число, яке дорівнює середньому геометричному від блочних коефіцієнтів;

– метод використання вагових коефіцієнтів [9,10], де

використання вагових коефіцієнтів у логістичних процесах широко застосовується для оцінки різних факторів, таких як витрати палива, час доставки вантажів та надійність перевезень.

У роботах з логістичної оптимізації вагові коефіцієнти використовуються для визначення важливості кожного критерію при багатокритеріальній оцінці ефективності перевезень. Наприклад, у працях [11,12, 19] про визначення ефективних технологічних процесів перевезень автотранспортом розглядаються такі параметри, як витрати на транспортування, собівартість підготовки вантажу та інші витрати, пов'язані з перевезенням. Сучасні модифікації методу вагових коефіцієнтів включають:

- 1.аналіз експертних оцінок для визначення вагових коефіцієнтів, що впливають на ефективність перевезень;
- 2.розробку математичних моделей, які включають вагові коефіцієнти для оптимізації маршрутів та вибору транспорту;
- 3.інтеграцію із системами управління якістю, де вагові коефіцієнти використовуються для оцінки ризиків та якості доставки. Обмеження цього методу пов'язані з суб'єктивністю вибору вагових коефіцієнтів, проте використання експертних оцінок та статистичного аналізу допомагає підвищити об'єктивність оцінок.

- метод ранжування[11].

Суть методу ранжування для визначення ефективності міжнародних вантажних перевезень полягає у порівнянні та ранжуванні різних критеріїв, які впливають на ефективність цих перевезень. Основні кроки цього методу включають:

Визначення критеріїв: вибір ключових показників, таких як витрати, час доставки, надійність транспортування, безпека тощо.

- 1.Оцінка критеріїв: кожний критерій оцінюється за певними параметрами, наприклад, за шкалою від 1 до 10.

2. Ранжування критеріїв: критерії ранжуються за їхньою важливістю або впливом на загальну ефективність перевезень.
3. Визначення пріоритетності: на основі ранжування визначаються пріоритети для оптимізації логістичних процесів.
4. Оптимізація процесів: використання результатів ранжування для вдосконалення маршрутів, вибору транспорту та інших аспектів перевезень.

Цей метод ранжування дозволяє логістичним компаніям швидко ідентифікувати слабкі місця та сфокусуватися на найбільш важливих аспектах для підвищення ефективності міжнародних вантажних перевезень.

– (метод бального оцінювання) [12].

Суть методу бального оцінювання для визначення ефективності міжнародних вантажних перевезень полягає у присвоєнні балів різним критеріям, які впливають на ефективність цих перевезень. Основні кроки цього методу включають:

1. Визначення критеріїв для вибору ключових показників, таких як витрати, час доставки, надійність транспортування, безпека тощо.
2. Присвоєння балів, де кожному критерію присвоюється певна кількість балів залежно від його важливості та виконання вимог.
3. Сумарна оцінка, яка включає сумування балів за усіма критеріями для отримання загальної оцінки ефективності перевезень.
4. Порівняння варіантів: за різними їхніми загальними оцінками для визначення найефективнішого з них.

Цей метод бального оцінювання для визначення ефективності дає змогу логістичним компаніям швидко ідентифікувати найкращі варіанти перевезень та сфокусуватися на вдосконаленні тих аспектів, які мають найбільший вплив на загальну ефективність міжнародних вантажних перевезень.

– інтегруванням вимірних показників ефективності є одним із відомих способів, наприклад «радара» або, (що те саме) «профілів», в один числовий показник без «зважування» [10].

Радарна діаграма - це діаграма та/або графік у площині, що складається з послідовності рівновеликих кутів, які утворюються відрізками, що виходять з однієї точки. Довжина кожного відрізка пропорційна значенню одного з чинників ефективності перевезення. Легко обчислити площу многокутника, утвореного кінцями усіх відрізків. Цю площу можна прийняти за інтегральний коефіцієнт ефективності.

Аналіз праць показує, що перелік чинників, які впливають на ефективність транспортування вантажів залежить від доволі великої кількості чинників, причому багато простих чинників впливають на значення декількох узагальнених показників. Це може призводити до багатократного їх врахування в узагальнених показниках та необґрунтованого збільшення значень ефективності. Необхідність підвищення енергетичної ефективності автопоїздів шляхом вдосконалення методів проектування за рахунок застосування нових показників та критеріїв наведена у статті [12].

Питання енергетичної ефективності роботи АТЗ розглядалися також для вдосконалення процесу планування перевезення вантажів автомобільним транспортом [13], у теорії автомобіля, динаміки автомобіля, теорії руху автомобіля та багатоланкових автопоїздів [14-16].

Наведений огляд і аналіз цих праць дає змогу зробити висновок, що задача розроблення науково обґрунтованих інтегральних критеріїв для вибору автопоїздів для міжнародних вантажних перевезень ускладнюється з розвитком сучасних технологій і залишається актуальною у наукових дослідженнях.

МЕТА ТА ЗАДАЧІ ДОСЛІДЖЕННЯ

Метою дослідження є аналіз впливу чинників енергоефективності системи “дизельний двигун – трансмісія” на інтегральний показник ефективності за умов технологічних досягнень впродовж останніх років у ЄС та розроблення методології розрахунку інтегрального показника техніко-технологічної ефективності АТЗ для міжнародних вантажних автомобільних перевезень. Для досягнення цієї мети слід розробити алгоритм обчислення інтегрального показника ефективності, використавши метод аналітичної ієрархії Т. Сааті [17,18].

РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ

1. Енергоефективність автопоїзда
2. Енергетична ефективність автопоїзда — це міра того, наскільки перевезення ним оптимізовані щодо використання енергетичних ресурсів та зниження витрат на паливо.
3. Для визначення енергетичної ефективності автопоїзда слід враховувати такі фактори:

4. Тип двигуна та його ефективність.
5. Вантажопідйомність та рівень завантаження.
6. Шини та їхній оптимальний тиск.
7. Аеродинамічні властивості автопоїздів.
8. Стиль водіння та поведінка водіїв.
9. Технічний стан автопоїздів та їхнє обслуговування.
10. Вплив кліматичних умов та рельєфу.

Експертно-функціональна модель інтегрального показника ефективності дизельного двигуна E для автопоїзда під час міжнародних вантажних автомобільних перевезень може бути представлена у такому вигляді:

$$E = w_1 \cdot \frac{T}{m} + w_2 \cdot \frac{\eta \cdot \omega}{I} - w_3 \cdot \alpha \quad (4)$$

де: T — крутний момент (Н·м), m — маса двигуна (кг), I — момент інерції (кг·м²),
 ω — кутова швидкість (рад/с), α — кутове пришвидшення (рад/с²), η — ККД (безрозмірний),
 w_1, w_2, w_3 — вагові коефіцієнти, що відображають значущість кожного параметра.

Пояснення формули (4):

1. Відношення крутного моменту до маси (T/m) — показує тягові можливості двигуна на одиницю маси, що є важливим для динаміки автопоїзда.
2. Відношення добутку ККД та кутової швидкості до моменту інерції ($\frac{\eta \cdot \omega}{I}$) — характеризує ефективність використання обертальної енергії та швидкість досягнення максимальної потужності.
3. Кутове пришвидшення зі знаком "мінус" ($-\alpha$) — відображає інерційність двигуна при зміні навантажень, оскільки високе пришвидшення може призвести до збільшення зносу та нестабільної роботи автопоїзда.

З урахуванням особливостей системи "дизельний двигун – трансмісія", експертно-функціональна модель інтегрального показника ефективності E може бути записана так:

$$E = w_1 \cdot \frac{T}{m} + w_2 \cdot \frac{\eta \cdot \omega}{I} - w_3 \cdot \alpha + w_4 \cdot \eta_{\text{тр}} - w_5 \cdot L_{\text{тр}} \quad (5)$$

де: $\eta_{\text{тр}}$ — коефіцієнт корисної дії трансмісії (безрозмірний), $L_{\text{тр}}$ — сумарні втрати потужності в трансмісії (Вт або безрозмірна величина, що відображає відносні втрати),

w_1, w_2, w_3, w_4, w_5 — вагові коефіцієнти, що відображають значущість кожного параметра.

Пояснення складових моделі (5):

$\frac{T}{m}$ — 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.

$-\alpha$ — негативний вплив інерційності двигуна на стабільність роботи і його зношення.

$\eta_{\text{тр}}$ — ефективність передачі потужності від двигуна до коліс, що безпосередньо впливає на загальну енергоефективність автопоїзда.

$-L_{\text{тр}}$ — втрати в трансмісії, які знижують корисну потужність і динамічні характеристики.

Щоб визначити вагові коефіцієнти, застосуємо метод аналітичної ієрархії (MAI) Т. Сааті, [19,20].

Алгоритм MAI складається із сукупності наступних етапів:

1. Перший етап полягає в структуризації завдання у вигляді ієрархічної структури з декількома рівнями.

2. На другому етапі виконуються попарні порівняння елементів кожного рівня.

3. Обчислюються коефіцієнти ваги для елементів кожного рівня. При цьому виконується перевірка якості даних на узгодженість за допомогою визначення індексу узгодженості та відношення узгодженості матриці попарних порівнянь. Індекс узгодженості (CI):

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

Відношення узгодженості (CR):

$$CR = CI / IO,$$

де: $IO = 1,12$ при розмірності матриці порівнянь $n = 5$. Матриця попарних порівнянь вважається добре узгодженою, якщо $CR \leq 0,1$ при $n \geq 5$

Застосування методу аналітичної ієрархії Т. Сааті для визначення вагових коефіцієнтів.

Крок 1: Структуризація ієрархії

Головна мета: визначити інтегральний показник ефективності системи "дизельний двигун – трансмісія".

Критерії (рівень 2):

1. $\frac{T}{m}$ (тягові можливості на одиницю маси).
2. $\frac{\eta \cdot \omega}{I}$ (ефективність використання обертальної енергії).
3. $-\alpha$ (негативний вплив інерційності).
4. η_{tr} (ККД трансмісії).
5. $-L_{tr}$ (втрати в трансмісії).

Крок 2: Попарне порівняння критеріїв

Побудова матриці попарних порівнянь (шкала від 1 до 9):

Критерій	$\frac{T}{m}$	$\frac{\eta \cdot \omega}{I}$	$-\alpha$	η_{tr}	$-L_{tr}$
$\frac{T}{m}$	1	3	5	1	2
$\frac{\eta \cdot \omega}{I}$	1/3	1	3	1/3	1
$-\alpha$	1/5	1/3	1	1/5	1/3
η_{tr}	1	3	5	1	2
$-L_{tr}$	1/2	1	3	1/2	1

Крок 3: Обчислення вагових коефіцієнтів

1. Нормалізація матриці (сума кожного стовпця):

Стовпець 1: $1+1/3+1/5+1+1/2=3.0331+1/3+1/5+1+1/2=3.033$.

Стовпець 2: $3+1+1/3+3+1=8.3333+1+1/3+3+1=8.333$.

Стовпець 3: $5+3+1+5+3=17.5+3+1+5+3=17$.

Стовпець 4: $1+1/3+1/5+1+1/2=3.0331+1/3+1/5+1+1/2=3.033$.

Стовпець 5: $2+1+1/3+2+1=6.3332+1+1/3+2+1=6.333$.

2. Нормалізована матриця (елементи поділені на суму стовпця):

Критерій	$\frac{T}{m}$	$\frac{\eta \cdot \omega}{I}$	$-\alpha$	η_{tr}	$-L_{tr}$
$\frac{T}{m}$	0.329	0.360	0.294	0.329	0.316
$\frac{\eta \cdot \omega}{I}$	0.109	0.120	0.176	0.109	0.158
$-\alpha$	0.066	0.040	0.059	0.066	0.053
η_{tr}	0.329	0.360	0.294	0.329	0.316
$-L_{tr}$	0.165	0.120	0.176	0.165	0.158

3. Середні значення по рядках (вагові коефіцієнти):

$w_1=0.326, w_2=0.134, w_3=0.057, w_4=0.326, w_5=0.157$.

Крок 4: Перевірка узгодженості

Максимальне власне значення (λ_{max}): 5.046. Індекс узгодженості (CI): $(\lambda_{max} - n)/(n - 1) = 0.0115$.

Відношення узгодженості (CR): $CR = \frac{CI}{IO} = 0.0103$ (де $RI=1.12$ для $n = 5$). $CR < 0.10 \rightarrow$ матриця узгоджена.

Підсумок

Інтегральний показник ефективності:

$$E = 0.326 \cdot \frac{T}{m} + 0.134 \cdot \frac{\eta \cdot \omega}{I} - 0.057 \cdot \alpha + 0.326 \cdot \eta_{tr} - 0.157 \cdot L_{tr}$$

де:

1. $\frac{T}{m}$ (тягові можливості на одиницю маси).
2. $\frac{\eta \cdot \omega}{I}$ (ефективність використання обертальної енергії).
3. $-\alpha$ (негативний вплив інерційності).
4. η_{tr} (ККД трансмісії).
5. $-L_{tr}$ (втрати в трансмісії).

Ця модель дає змогу комплексно оцінити ефективність системи, враховуючи ключові параметри двигуна та трансмісії.

Використані дані для порівняння.

Автопоїзд Volvo FM

Двигун: Volvo D13 (найбільш потужний варіант для порівняння).

Потужність: 500 к.с. = 368 кВт, Крутний момент: 2500 Н.м,

Оберти (максимального крутного моменту): 980-1270 об/хв (візьмемо середнє значення 1125 об/хв)

Трансмісія: I-Shift (автоматизована механічна коробка передач).

Маса двигуна (m): Приблизно 1000 кг (оцінка).

Момент інерції двигуна (I): Приблизно 0.8 кг·м² (оцінка).

ККД двигуна (η): 0.45 (для дизельних двигунів).

ККД трансмісії (η_{tr}): 0.90 (для автоматизованих механічних КПП).

Кутове прискорення (α): Нехай 20 рад/с² (оцінка).

Втрати в трансмісії (L_{tr}): 8% від потужності двигуна ($0.08 \cdot 368 \text{ кВт} = 29.44 \text{ кВт} = 29440 \text{ Вт}$).

Автопоїзд Freightliner Cascadia

Двигун: Detroit DD15 (найбільш потужний варіант для порівняння).

Потужність: 505 к.с. = 371 кВт

Крутний момент: 1850 lb-ft = 2508 Нм

Оберти (максимального крутного моменту): Приблизно 1200 об/хв

Трансмісія: Detroit DT12 (автоматизована механічна коробка передач).

Маса двигуна (m): Приблизно 1050 кг (оцінка).

Момент інерції двигуна (I): Приблизно 0.85 кг·м² (оцінка).

ККД двигуна (η): 0.45 (для дизельних двигунів).

ККД трансмісії (η_{tr}): 0.92 (для автоматизованих механічних КПП).

Кутове прискорення (α): Нехай 22 рад/с² (оцінка).

Втрати в трансмісії (L_{tr}): 7% від потужності двигуна ($0.07 \cdot 371 \text{ кВт} = 25.97 \text{ кВт} = 25970 \text{ Вт}$).

2. Розрахунок інтегрального показника

Автопоїзд Volvo FM: $\frac{T}{m} = 2500/1000 = 2.5$; $\omega = 2\pi \cdot 1125/60 \approx 117.8 \text{ рад/с}$; $\frac{\eta \cdot \omega}{I} = 0.45 \cdot 117.8/0.8 \approx 66.39$;

$E = 0.326 \cdot 2.5 + 0.134 \cdot 66.39 - 0.057 \cdot 20 + 0.326 \cdot 0.90 - 0.157 \cdot 29440/1000$;

$E \approx 0.326 \cdot 2.5 + 0.134 \cdot 66.39 - 0.057 \cdot 20 + 0.326 \cdot 0.90 - 0.157 \cdot 29440/1000 \approx$

$\approx 0.815 + 8.906 - 1.14 + 0.293 - 4.62 \approx 0.815 + 8.906 - 1.14 + 0.293 - 4.62 \approx 4.254$.

Автопоїзд Freightliner Cascadia: $\frac{T}{m} = 2508/1050 \approx 2.39$; $T = 1050/2508 \approx 2.39$;

$\omega = 2\pi \cdot 1200/60 \approx 125.7 \text{ рад/с}$; $\omega = 602\pi \cdot 1200 \approx 125.7 \text{ рад/с}$;

$\frac{\eta \cdot \omega}{I} = 0.45 \cdot 125.7/0.85 \approx 66.55$; $\eta \cdot \omega = 0.85 \cdot 125.7 \approx 66.55$; $E = 0.326 \cdot 2.39 + 0.134 \cdot 66.55 - 0.057 \cdot 22 + 0.326 \cdot 0.92 - 0.157 \cdot 25970/1000 \approx$

$57 \cdot 25970/1000 \approx E = 0.326 \cdot 2.39 + 0.134 \cdot 66.55 - 0.057 \cdot 22 + 0.326 \cdot 0.92 - 0.157 \cdot 25970/1000 \approx$

$\approx 0.779 + 8.929 - 1.254 + 0.299 - 4.077 \approx 4.676 \approx 0.779 + 8.929 - 1.254 + 0.299 - 4.077 \approx 4.676$.

3. Порівняння та обґрунтування

За розрахунками інтегрального показника ефективності, Freightliner Cascadia (4.676) має дещо вищу ефективність системи "двигун - трансмісія" ніж Volvo FM (4.254).

Вищий ККД трансмісії (0.92 проти 0.90) сприяє меншим втратам потужності.

Більш оптимальне відношення обертів і моменту. Дещо нижчі втрати в трансмісії.

На підставі цих результатів можна зробити висновок, що за інтегральним показником ефективності, розрахованим на основі наданої моделі та даних про два тягачі, Автопоїзд Freightliner Cascadia має дещо вищу ефективність системи "двигун - трансмісія".

ОБГОВОРЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ДОСЛІДЖЕННЯ

Розроблення методології розрахунку інтегрального показника ефективності системи "дизельний двигун – трансмісія" є складною задачею, оскільки розвиток технологій проектування автопоїздів призводить до появи автопоїздів, для оцінки ефективності роботи яких в умовах, що постійно змінюються, тому буде потреба у збільшенні кількості чинників, значення та вплив яких змінюється в доволі широкому діапазоні. Відомі методи моделювання та розрахунку інтегрального показника, очевидно, дають змогу отримувати деякі наближення до реального значення показника ефективності системи "дизельний двигун – трансмісія", однак задача його розрахунку залишається актуальною.

Запропонований у цій статті підхід щодо розрахунку інтегрального показника ефективності системи "дизельний двигун – трансмісія" для автопоїзда під час міжнародних вантажних автомобільних перевезень є обґрунтованим, враховує тільки одну важливу складову ефективності: енергетичну. Однак, цей підхід може бути узагальнений. Зокрема, необхідно в цьому підході доповнити алгоритм врахуванням багатьох складових. Однак, задача узагальнення носитиме здебільшого технічний характер і пов'язана із більшою складністю. Аналіз цієї проблеми та одержані результати досліджень будуть викладені у наступних публікаціях.

Отже, коли існує свобода добору режимів сумісної роботи двигуна й трансмісії, оптимальними є моменти перемикавання передач, які забезпечують автомобілю найвищу паливну ощадність [15]. При цьому окремо про втілення особливих динамічних властивостей автомобіля говорити нема потреби: умова динамічності справджується у силу заданості динаміки руху автомобіля. Якщо ж програма руху машини зумовлена обмеженнями приймистості чи тягово-швидкісних можливостей, оптимальними стають моменти перемикавання передач, які максимально покращують динаміку автомобіля, а вимога паливної ощадності втрачає сенс.

Оцінка ефективності системи загалом узгоджується з іншими критеріями, такими як витрати палива, однак, слід враховувати, що реальні показники можуть відрізнятися залежно від умов експлуатації, навантаження, стилю водіння та інших факторів. Також, потрібно зазначити, що надійність та вартість обслуговування також є важливими факторами при виборі тягача автопоїзда для міжнародних вантажних автомобільних перевезень, і тут автопоїзд Volvo FM може мати переваги.

4. Оцінка переваг розглянутих тягачів за іншими критеріями

Витрати палива: За даними випробувань, обидва тягачі мають порівнянні показники витрати палива, але Freightliner Cascadia з двигуном Detroit DD15 часто показує дещо кращі результати на трасі.

Надійність: Volvo FM відомий своєю надійністю та довговічністю, хоча Freightliner Cascadia також має хороші показники, особливо з двигунами Detroit.

Вартість обслуговування: Вартість обслуговування може варіюватися залежно від регіону, але загалом Freightliner Cascadia може бути дешевше в обслуговуванні в Північній Америці, тоді як Volvo FM - в Європі.

ВИСНОВКИ

Сформульовано концептуальну модель методології визначення енергоефективності системи "двигун – трансмісія" сучасних дизельних автопоїздів. Методика враховує вимоги стандартів регулювання міжнародних вантажних перевезень і управління їх ефективністю та якістю. Оцінювання ефективності системи "двигун – трансмісія" ґрунтується на виявленні та визначенні ступенів впливу факторів, які можуть бути використані для уточнення визначення ефективності перевезення вантажів універсальними автопоїздами у міжнародному сполученні, що відкриває можливість забезпечення спрямованого синтезу елементів та підсистем інноваційних транспортних систем для досягнення заданих показників ефективності та якості.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Економіка логістичних систем: [Монографія] / За науковою редакцією Є. Криківського та С. Кубіва. – Львів: Вид-во Нац. ун-ту “Львівська політехніка”, 2008. – 596 с.
2. Кухтик Н.О. Національний транспортний університет. Уточнення математичної моделі руху автомобіля з урахуванням прогрівання двигуна в процесі руху. Вчені записки Таврійського національного університету імені В.І. Вернадського. Серія “Технічні науки” (ISSN: 2663-595X), К.: 2020. Том 31(70). N 4. С. 233-238.
3. Теорія руху транспортних засобів [Текст] : підручник / І. А. Вікович. - Л. - Л. : Видавництво Національного університету "Львівська політехніка", 2013. - 671 с.
4. Hassan Moussa Nahim, Rafic Younes, Chadi Nohra, Mustapha Ouladsine. Complete Modeling for Systems of a Marine Diesel Engine. Journal of Marine Science and Application, 2015, 14(01): 93-104.
5. Хабутдинов Р. А. Системное формирование технологий автомобильных перевозок по критериям энерго- и ресурсоотдачи : дис. докт. техн. наук: 05.22.01. Киев, 2003. 332 с.
6. Хабутдинов Р. А., Коцюк О. Я. Энергоресурсная эффективность автомобиля. К.: УТУ, 1997. 137 с.
7. Гальона І. І. Підвищення енергоефективності перевезень дрібних партій вантажів в рамках життєвого циклу автомобіля. – 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, Міністерство освіти і науки України, Київ, 2021.
8. Ачкасова Л.М. Оцінка ефективності процесу перевезення вантажів. Економіка транспортного комплексу. Вип. 24., 2014, с. 117-124
9. Таценко О. В. Критерії оцінки і вибору автотранспортних засобів для транспортних технологій [Електронний ресурс] / О. В. Таценко // Технічне забезпечення інноваційних технологій в агропромисловому комплексі : матеріали III Міжнар. наук.-практ. Інтернет-конференції, (Мелітополь, 01-26 листопада 2021 р.) / ТДАТУ; ред. кол. В. М. Кюрчев, В. Т. Надикто, О. Г. Скляр [та ін.]. - Мелітополь : ТДАТУ, 2021. - С. 473-477.
10. О.О. Соларьов, О.В. Таценко, Т.П. Волошко Критерії вибору транспортних засобів для перевезення вантажів / Ю / Комунальне господарство міст, 2022, том 6, випуск 173 - с. 189-194.
11. Критерії вибору великовагових транспортних засобів для ефективних і безпечних перевезень / В. В. Аулін, О. М. Тертиця, Т. М. Надич [та ін.] // Центральноукраїнський науковий вісник. Технічні науки: зб. наук. пр. - Кропивницький : ЦНТУ, 2024. - Вип. 10(41). - Ч. 2. - С. 169-187
12. Поляков А.П., Галушак О.О., Галушак Д.О., Грабенко М.Д. Методика вибору рухомого складу, маршруту і графіка перевезення вантажів. Наукові праці ВНТУ. 2011, №3. С. 1–10.
13. Самостян В.Р. Удосконалення процесу планування перевезення вантажів автомобільним транспортом: монографія / В.Р. Самостян, В.П. Онищук – Луцьк : ІВВ ЛНТУ, 2023. 158 с.
14. Аналіз показників енергетичної ефективності багатовісних автомобілів та багатоланкових автопоїздів / М. А. Подригало, Р. О. Кайдалов, М. М. Альокса, В. І. Омельченко // Вісник Національного технічного університету "ХПІ". Сер. : Автомобіле- та тракторобудування = Bulletin of the National Technical University "KhPI". Ser. : Automobile and Tractor Construction : зб. наук. пр. – Харків : НТУ "ХПІ", 2023. – № 1. – С. 40-46.
15. Гашук П. М. Енергетична ефективність автомобіля / П. М. Гашук. – Львів: СВІТ, 1992. – 208 с.
16. Динаміка автомобіля / М. А. Подригало, В. П. Волков, А. А. Бобошко та ін. – Харків: Видавництво ХНАДУ, 2008. – 424 с.
17. Saaty T. L. The analytic hierarchy process: planning, priority setting, resource allocation. New York : McGraw-Hill International Book Co., 1980. 287 p.
18. Сааті Т. Прийняття рішень. Метод аналізу ієрархій / Т. Сааті. – М.: Радіо і зв'язок, 1993. – 320 с.
19. Проблеми організації, управління та підвищення ефективності транспортних перевезень / за ред. Л. М. Савчук, Г. С. Прокудіна: Монографія. – Дніпро: Пороги, 2021. – 300 с.

REFERENCES

1. Krykavskiy, Y., & Kubiv, S. (Eds.). (2008). Ekonomika logistychnykh system [Economics of logistic systems]. Lviv: Lviv Polytechnic National University Publishing.
2. Kukhtyk, N. O. (2020). Utochnennia matematychnoyi modeli rukhu avtomobilia z urakhuvanniam prohrivannia dvyguna v protsesi rukhu [Refinement of the mathematical model of vehicle motion

considering engine warm-up during movement]. Vcheni Zapisky Tavriiskoho Natsionalnoho Universytetu imeni V. I. Vernadskoho. Seriya: Tekhnichni Nauky, 31(70)(4), 233–238.

3. Vikovych, I. A. (2013). Teoriia rukhu transportnykh zasobiv [Theory of vehicle motion]. Lviv: Lviv Polytechnic National University Publishing.

4. Nahim, H. M., Younes, R., Nohra, C., & Ouladsine, M. (2015). Complete modeling for systems of a marine diesel engine. *Journal of Marine Science and Application*, 14(1), 93–104.

5. Khabutdinov, R. A. (2003). Systemnoe formirovanie tekhnologii avtomobilnykh perevozok po kriteriiam enerho- i resursootdachi [System-based formation of automotive transportation technologies based on energy and resource efficiency criteria] (Doctoral dissertation). Kyiv.

6. Khabutdinov, R. A., & Kotsiuk, O. Ya. (1997). Enerhoresurna efektyvnist avtomobilia [Energy resource efficiency of a vehicle]. Kyiv: UTU.

7. Halyona, I. I. (2021). Pidhyshchennia enerhoefektyvnosti perevezen dribnykh partii vantazhiv v ramkakh zhyttievoho tsykladu avtomobilia [Improving energy efficiency of small cargo shipments within the vehicle life cycle] (PhD dissertation). National Transport University, Kyiv.

8. Achkasova, L. M. (2014). Otsinka efektyvnosti protsesu perevezennia vantazhiv [Evaluation of freight transportation efficiency]. *Ekonomika Transportnoho Kompleksu*, (24), 117–124.

9. Tatsenko, O. V. (2021). Kryterii otsinky i vyboru avtotransportnykh zasobiv dlia transportnykh tekhnolohii [Criteria for evaluation and selection of motor vehicles for transport technologies]. In *Teh. zabezpechennia innovatsiinykh tekhnolohii v APK: Materialy III Mizhnar. nauk.-prakt. internet-konferentsii* (pp. 473–477). Melitopol: TSATU.

10. Solariov, O. O., Tatsenko, O. V., & Voloshko, T. P. (2022). Kryterii vyboru transportnykh zasobiv dlia perevezennia vantazhiv [Criteria for selecting vehicles for freight transport]. *Komunalne Hospodarstvo Mist*, 6(173), 189–194.

11. Aulin, V. V., Tertytsia, O. M., Nadych, T. M., et al. (2024). Kryterii vyboru velykovahovykh transportnykh zasobiv dlia efektyvnykh i bezpechnykh perevezen [Criteria for the selection of heavy-duty vehicles for efficient and safe transport]. *Tsentrlnoukrainskyi Naukovyi Visnyk. Tekhnichni Nauky*, 10(41)(2), 169–187.

12. Poliakov, A. P., Halushchak, O. O., Halushchak, D. O., & Hrabenko, M. D. (2011). Metodyka vyboru rukhomoho skladu, marshrutu i hrafika perevezennia vantazhiv [Methodology for selecting rolling stock, route, and schedule for freight transport]. *Naukovi Pratsi VNTU*, (3), 1–10.

13. Samostian, V. R., & Onyshchuk, V. P. (2023). Udoshkonalennia protsesu planuvannia perevezennia vantazhiv avtomobilnym transportom [Improving the planning process of freight transport by road] (Monograph). Luts'k: IVV LNTU.

14. Podryhalo, M. A., Kaidalov, R. O., Alioksa, M. M., & Omelchenko, V. I. (2023). Analiz pokaznykiv enerhetychnoi efektyvnosti bahatovisnykh avtomobiliv ta bahatolankovykh avtopoizdiv [Analysis of energy efficiency indicators of multi-axle vehicles and multi-link road trains]. *Visnyk Natsionalnoho Tekhnichnoho Universytetu "KhPI". Seriya: Avtomobile- ta Traktorobuduvannia*, (1), 40–46.

15. Hashchuk, P. M. (1992). Enerhetychna efektyvnist avtomobilia [Energy efficiency of a vehicle]. Lviv: Svit.

16. Podryhalo, M. A., Volkov, V. P., Boboshko, A. A., et al. (2008). *Dynamika avtomobilia* [Vehicle dynamics]. Kharkiv: KhNADU Publishing.

17. Saaty, T. L. (1980). *The analytic hierarchy process: Planning, priority setting, resource allocation*. New York: McGraw-Hill.

18. Saaty, T. (1993). *Pryiniattia rishen. Metod analizu ierarkhii* [Decision making. The analytic hierarchy process]. Moscow: Radio i Sviaz.

19. Savchuk, L. M., & Prokudin, H. S. (Eds.). (2021). *Problemy orhanizatsii, upravlinnia ta pidvyshchennia efektyvnosti transportnykh perevezen* [Problems of organization, management, and efficiency improvement in transport logistics] (Monograph). Dnipro: Porohy.

Prykhodko V. Energy efficiency assessment of modern road trains for international freight transportation

The paper proposes an original modeling procedure and an improved statistical evaluation methodology for parameters characterizing the performance efficiency of the "engine – transmission" energy system of modern road trains Volvo FM and Freightliner Cascadia used in international freight transportation, equipped with Volvo D13 and Detroit DD15 diesel engines. The methodology is developed in

accordance with current international standards for freight transport, particularly regarding environmental sustainability, fuel efficiency, stability of technical characteristics, and economic feasibility.

The evaluation of the "engine – transmission" system efficiency is based on a comprehensive analysis of influencing factors, which enables a deeper understanding of the relationship between vehicle operating parameters and energy consumption during operation on international routes. The analytical hierarchy process and adapted statistical tools are employed to ensure the validity of conclusions and the practical applicability of the methodology. Special attention is given to identifying the most significant factors that affect the overall energy efficiency of road trains.

The theoretical foundation of the study is built upon the works of prominent researchers in the field of transport technologies and logistics, including Ihor Vikovych, Volodymyr Volkov, Petro Hashchuk, Heorhiy Prokudin, Anatolii Lebedev, Ihor Murovanyi, Volodymyr Sakhno, Mykhailo Podryhalo, Ramazan Khabutdinov, and others. The proposed results may prove useful for enhancing the efficiency of international freight transport, reducing fuel consumption, and improving the technical policy of motor transport enterprises.

Keywords: road train, diesel engine, transmission, energy efficiency, international transportation, freight, analytic hierarchy process.

ПРИХОДЬКО Всеволод Едуардович, аспірант кафедри транспортних технологій, Національний університет «Львівська політехніка», e-mail: prykhodkovsevolod@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-7582-1693>

Vsevolod PRYKHODKO, Postgraduate Student, Department of Transport Technologies, Lviv Polytechnic National University, e-mail: prykhodkovsevolod@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-7582-1693>

Автор висловлює подяку насамперед науковому керівнику Ігорю ВІКОВИЧУ за допомогу у написанні і редагуванні цієї статті, а також кафедрі транспортних технологій НУЛП за фахові поради.

DOI 10.36910/automash.v1i24.1742