

## ТРАНСПОРТНІ ТЕХНОЛОГІЇ (ЗА ВИДАМИ)

УДК 519.865:338.518

DOI <https://doi.org/10.33082/td.2025.4-27.08>

### РОЗРАХУНОК ІНТЕГРАЛЬНИХ ПОКАЗНИКІВ ЕФЕКТИВНОСТІ МАРШРУТІВ ВАНТАЖНИХ ПЕРЕВЕЗЕНЬ У США

**І.А. Вікович<sup>1</sup>, А.Ф. Обшта<sup>2</sup>, В.Е. Приходько<sup>3</sup>**

<sup>1</sup>д.т.н., професор кафедри транспортних технологій,  
Національний університет «Львівська політехніка», Львів, Україна,  
ORCID ID: 0000-0003-0281-158X

<sup>2</sup>д.т.н., професор кафедри захисту інформації,  
Національний університет «Львівська політехніка», Львів, Україна,  
ORCID ID: 0000-0001-5151-312X

<sup>3</sup>аспірант кафедри транспортних технологій,  
Національний університет «Львівська політехніка», Львів, Україна,  
ORCID ID: 0000-0002-7582-1693

#### **Анотація**

У статті досліджено підходи до визначення ефективності маршрутів у сфері міжнародних вантажних перевезень одноканковими автопоїздами (МВПОАП). Ефективність МВПОАП розглядається як багатофакторна характеристика, що включає економічні, часові, екологічні, соціальні та експлуатаційні показники. Автори акцентують увагу на необхідності комплексної оцінки логістичних рішень, яка повинна базуватись не тільки на традиційних критеріях витрат і тривалості МВПОАП, а й враховувати енергетичну, транспортну та дорожню ефективність засобів перевезень та фактори надійності поставання вантажів, екологічної сталості, ефективності використання ресурсів та технологічного супроводу транспортного процесу. У роботі наголошено на доцільності поєднання класичних методів оцінювання (вартість перевезення на милю, час доставки, індекси надійності) із сучасними багатокритеріальними підходами – Data Envelopment Analysis (DEA), АНР, TOPSIS, що дають змогу враховувати велику кількість параметрів під час вибору оптимального маршруту.

У межах порівняльного аналізу враховано досвід США, Німеччини, Польщі та Великої Британії щодо трактування ефективності маршрутів. Відзначено, що акценти в оцінці залежать від пріоритетів – економічної вигоди, екологічної безпеки, надійності логістичного ланцюга чи інтермодальної інтеграції. Враховано, що у німецьких дослідженнях домінує підхід сталого розвитку з інтеграцією критеріїв часу, витрат та пропускної спроможності інфраструктури. Польські вчені застосовують інструменти DEA для побудови багатовимірної моделі, тоді як британські дослідники акцентують на оцінці зовнішніх ефектів і енергоефективності.

*Систематизовано результати провідних досліджень щодо цифрових інструментів оптимізації логістики: автоматизованого планування маршрутів, AI-рішень та програм типу Route4Me, які скорочують витрати, викиди CO<sub>2</sub>, підвищують інтенсивність перевезень і гнучкість системи до змін попиту. Підкреслено важливість телекомунікаційних і навігаційних систем для моніторингу ефективності автопоїздів, особливо в умовах складного рельєфу, платних доріг і транскордонного трафіку.*

*Запропоновано концепцію експертно-функціональної моделі оцінки ефективності маршрутів, що враховує енергетичну, транспортну та дорожню ефективність елементів перевізного процесу з урахуванням специфіки МВПОАП. Підкреслено, що сучасні дослідження МВПОАП зазвичай аналізують лише окремі параметри, тоді як запропонована математична модель інтегрує ключові чинники для формування обґрунтованих управлінських рішень у сфері міжнародних автоперевезень. Наголошено на потребі подальших досліджень, спрямованих на подолання нестачі якісних даних, недостатньої гнучкості наявних моделей та обмеженого охоплення критичних ризиків логістичної інфраструктури під час МВПОАП.*

**Ключові слова:** міжнародні вантажні перевезення, автопоїзд, ефективність, маршрут, логістика, оптимізація, метод, критерій, багатокритеріальний аналіз, Data Envelopment Analysis, АНР, TOPSIS, енергетична, транспортна, дорожня ефективність, інтегральний показник, транспортна система, цифрові логістичні рішення, маршрутне планування.

## CALCULATION OF INTEGRAL EFFICIENCY INDICATORS FOR FREIGHT TRANSPORTATION ROUTES IN THE UNITED STATES

I.A. Vikovych<sup>1</sup>, A.F. Obshta<sup>2</sup>, V.E. Prykhodko<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Doctor of Technical Sciences, Professor, Department of Transport Technologies,  
Lviv Polytechnic National University, Lviv, Ukraine,  
ORCID ID: 0000-0003-0281-158X

<sup>2</sup>Doctor of Technical Sciences, Professor, Department of Information Security,  
Lviv Polytechnic National University, Lviv, Ukraine,  
ORCID ID: 0000-0001-5151-312X

<sup>3</sup>PhD Student, Department of Transport Technologies,  
Lviv Polytechnic National University, Lviv, Ukraine,  
ORCID ID: 0000-0002-7582-1693

### **Summary**

The paper investigates approaches to assessing route efficiency in the field of international freight transportation performed by single-unit road trains. The efficiency of international freight transportation by road trains is considered as a multifactorial characteristic that includes economic, time-related, environmental, social, and operational indicators. The authors emphasize the necessity of a comprehensive evaluation of logistics decisions, which should be based not only on traditional criteria such as transportation costs and delivery time but also take into account the energy, transport, and road efficiency of transport vehicles, as well as supply reliability, environmental sustainability, resource efficiency, and technological support of the transportation process.

The study highlights the expediency of combining classical evaluation methods (cost per mile, delivery time, reliability indices) with modern multi-criteria decision-making approaches—Data Envelopment Analysis (DEA), Analytic Hierarchy Process (AHP), and TOPSIS—which enable the consideration of a large number of parameters when selecting an optimal transportation route.

Within the framework of a comparative analysis, the experience of the United States, Germany, Poland, and the United Kingdom in interpreting route efficiency is examined. It is noted that the emphasis in efficiency assessment depends on dominant priorities such as economic benefits, environmental safety, logistics chain reliability, or intermodal integration. German studies predominantly apply a sustainable development approach integrating time, cost, and infrastructure capacity criteria. Polish researchers actively use DEA tools to construct multidimensional efficiency models, whereas British studies focus on the assessment of external effects and energy efficiency.

The results of leading studies on digital logistics optimization tools are systematized, including automated route planning systems, artificial intelligence-based solutions, and software platforms such as Route4Me, which contribute to reducing costs and CO<sub>2</sub> emissions, increasing transportation intensity, and improving system flexibility in response to demand fluctuations. The importance of telecommunication and navigation systems for monitoring the operational efficiency of road trains is emphasized, especially under conditions of complex terrain, toll road networks, and cross-border traffic.

An expert-functional model for assessing route efficiency is proposed, which accounts for the energy, transport, and road efficiency of transportation process elements while considering the specific features of international freight transportation by road trains. It is emphasized that most contemporary studies analyze only individual parameters, whereas the proposed mathematical model integrates key factors to support well-founded managerial decision-making in the field of international road freight transportation. The necessity for further research aimed at overcoming data scarcity, limited flexibility of existing models, and insufficient coverage of critical logistics infrastructure risks is also highlighted.

**Key words:** international freight transportation; road train; efficiency; route; logistics; optimization; method; criterion; multi-criteria analysis; Data Envelopment Analysis; AHP; TOPSIS; energy efficiency; transport efficiency; road efficiency; integral indicator; transport system; digital logistics solutions; route planning.

### **Вступ**

Ефективність маршруту (МВПОАП) пов'язана з оптимізацією шляху руху вантажів між пунктами призначення за сукупністю критеріїв: ефективність конструкційних вузлів засобів перевезень, мінімізація часу, витрат (операційних та паливних), екологічних наслідків і забезпечення дотримання вимог доставки та безпеки [1].

Сучасне визначення ефективності маршруту МВПОАП базується на системному аналізі економічних, екологічних, соціальних і експлуатаційних чинників з використанням класичних транспортно-економічних залежностей та новітніх математичних та програмних цифрових інструментів.

Чинники, що визначають якість і надійність автотранспортних засобів та вплив дорожньо-транспортних умов експлуатації на ефективність перевезень загалом,

з урахуванням основних функцій інтелектуального транспорту, телекомунікаційних та навігаційних систем моніторингу параметрів автомобіля, його ідентифікації, диспетчерського керування та ефективності, розглянуто в [2].

У наукових джерелах США акцент спрямований на баланс між швидкістю, витратами й надійністю, а в Німеччині – на врахування часу, витрат, інфраструктури та сталості [3]. Серед альтернативних підходів до визначення ефективності маршруту можна виділити працю [4], де підкреслюється важливість взаємопов'язаності інфраструктур, інформаційної прозорості та цифрових рішень для підвищення ефективності транспортних коридорів.

Польські дослідники для ефективності маршруту використовують Data Envelopment Analysis (DEA), що охоплює витрати, обсяг, час і ресурси, ефективність маршруту [5]. У Великій Британії дослідження МВПОАП основані на зовнішніх ефектах, енергоефективності та модальній зміні (залізниця замість автотранспорту) [6].

У дослідженні [7] аналізується показник ефективності вантажної системи (Freight System Efficiency, FSE) на основі співвідношення ВВП до викидів парникових газів (GDP/GHG), який застосовується для моніторингу прогресу стратегії California Sustainable Freight Action Plan.

Стаття [8] містить покроковий опис формул і факторів (вага, об'єм, тарифи, додаткові збори), що впливають на загальну вартість перевезення.

Огляд актуальних рішень з автоматизації планування маршрутів, що дозволяють зменшити витрати, скоротити час доставки і мінімізувати викиди, виконано у статті [9]. Джерело [10] розкриває поняття “route efficiency” через системний підхід, а в дисертації [11] запропонована модель багатокритеріального вибору маршруту, яка об'єднує АНР і TOPSIS для аналізу не тільки вартості й часу, а й ризиків, якості сервісу, вимог галузі та особливостей вантажу.

У праці [12] аналізується роль сучасного програмного забезпечення для оптимізації маршрутів із використанням big data, AI, machine learning, тобто автоматизації вибору оптимального шляху, економії пального, мінімізації часу та підвищення задоволеності замовника.

Практичний опис одного з провідних рішень: Route4Me Route Planner, що використовується водіями для багатостадійних перевезень, виконано в [13].

Методика DEA є основою сучасного інструментарію для комплексної оцінки ефективності транспортних мереж, включаючи автопоїзди [14].

У статті [15] порівнюються методи АНР і TOPSIS для прийняття рішень про вибір оптимального місця розташування бізнесу. АНР передбачає побудову ієрархічної структури критеріїв і попарні експертні порівняння, що дозволяє враховувати відносну важливість кожного чинника. Метод оцінює суб'єктивні переваги та забезпечує перевірку на логічну узгодженість рішень. Особливістю TOPSIS є визначення оптимального варіанта на основі близькості до ідеального рішення.

Нині для оцінки МВПОАП застосовують класичні методи (cost-per-mile, ton-mile, Travel Time Index, buffer index) та сучасні методи DEA, АНР, TOPSIS. Також застосовують показники Freight System Efficiency (FSE), програми автоматизації (Route4Me, AI-системи), моделі оцінки ефективності з урахуванням екології, надійності, ризиків та структури вантажу.

### Головні проблеми щодо ефективності МВПОАП:

1. *Обмеженість критеріїв оцінки* – переважає фокус на витратах і часі, ігноруючи надійність, екологію, безпеку.
2. *Дефіцит достовірних даних* – щодо часу проходження кордонів, об'їздів, попиту.
3. *Регуляторна нестабільність* – геополітичні й митні зміни ускладнюють планування.
4. *Ігнорування погодних та інфраструктурних змін* – не враховуються затори, стан доріг, екологічні обмеження.
5. *Недостатня цифровізація* – неповною мірою використовуються можливості AI, IoT, Big Data.

**Метою дослідження** є розроблення концепції створення експертної моделі оцінки ефективності маршрутів з урахуванням енергетичної, транспортної та дорожньої ефективності дизельних автопоїздів [16; 17; 18] та особливостей транспортної системи США.

### Результати досліджень

Ефективність маршруту вантажних перевезень визначено на основі застосування десяти критеріїв, які наведені у табл. 1, та особливостей транспортної системи США [19].

Таблиця 1

Критерій	Примітки
$C_1$ (Вартість)	Мінімізувати
$C_2$ (Час)	Мінімізувати
$C_3$ (Ризики/Плата за дорогу)	Мінімізувати
$C_4$ (Рентабельність)	Максимізувати
$C_5$ (Використання вантажності)	Максимізувати
$C_6$ (Довжина ділянок з високою інтенсивністю руху)	Мінімізувати
$C_7$ (Кількість мостів та тунелів з обмеженням висоти автотранспорту)	Мінімізувати
$C_8$ (Сумарна висота підйомів та спусків на маршруті)	Мінімізувати
$C_9$ (Кількість складних поворотів для автопоїзда)	Мінімізувати
$C_{10}$ (Ефективність автопоїзда)	Максимізувати

Математична модель розрахунку ефективності маршруту вантажних перевезень на основі перерахованих у табл. 1 критеріїв подається у вигляді:

$$S_{mar} = \sum_{i=1}^{10} w_i N_i, \quad (1)$$

де:  $N_i = \|C_i\|$ ;

$w_i$  – вагові коефіцієнти, які розраховуються методом АНР (лінійна згортка).

Особливістю цієї моделі є використання інтегрального показника енергетичної, транспортної та дорожньої ефективності дизельного автопоїзда, розробленого авторами у працях [16; 17; 18].

Формули нормування чинників:

$$N = \|x\| = (x - x_{min}) / (x_{max} - x_{min}), \quad (2)$$

якщо  $x$  слід максимізувати для збільшення ефективності маршруту та

$$N = \|x\| = (x_{max} - x) / (x_{max} - x_{min}), \quad (3)$$

якщо чинник  $x$  слід мінімізувати для збільшення ефективності маршруту.

Визначення інтегрального показника  $E$  ефективності одноланкового дизельного автопоїзда (тягач+причіп) для виконання міжнародних вантажних перевезень з урахуванням усіх його найважливіших параметрів виконано за формулою (4), обґрунтованою у [18]:

$$E = 0,2109 \cdot \frac{T}{m} + 0,1254 \cdot \frac{\eta \cdot \omega}{I} - 0,0627 \cdot \alpha + 0,1254 \cdot \eta_{tr} - 0,0456 \cdot L_{tr} + \\ + 0,1073 \cdot P_v - 0,0319 \cdot m_k + 0,0609 \cdot J_p - 0,0319 \cdot f + 0,0609 \cdot R_t + \\ + 0,0392 \cdot K_{ss} + 0,0658 \cdot H_{st} + 0,0224 \cdot D_k + 0,0140 \cdot C_a,$$

де:  $T$  – крутний момент двигуна (Н·м); (4)

$m$  – маса двигуна (кг);

$I$  – момент інерції двигуна (кг·м<sup>2</sup>);

$\omega$  – кутова швидкість двигуна (рад/с);

$\alpha$  – кутове прискорення двигуна (рад/с<sup>2</sup>);

$\eta$  – коефіцієнт корисної дії двигуна (безрозмірний);

$\eta_{tr}$  – 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;

$K_{ss}$  – жорсткість підвіски (англ.: stiffness of the suspension);

$H_{st}$  – хід підвіски (англ.: suspension travel);

$D_k$  – діаметр колеса;

$C_a$  – коефіцієнт зчеплення.

У працях [16; 17; 18] проаналізовано ефективність функціональних систем дизельних автопоїздів, які використовуються у США для міжнародних вантажних перевезень. На основі розробленого авторами інтегрального індексу ефективності дизельного одноланкового автопоїзда встановлено, що найбільш ефективною системою серед таких автопоїздів є модель Freightliner Cascadia 2023.

Цю модель використано для аналізу та визначення ефективності маршруту «Чикаго (ІЛ) – Конкорд (NH)» на основі застосування інтегрального показника ефективності маршруту вантажних перевезень у США, який задається формулою (1). Саме перевезення здійснюється такою моделлю одноланкового автопоїзда Freightliner Cascadia 2023, для якої індекс ефективності автопоїзда  $E = 0,54$ .

**Маршруту № 1 (через I-90 із платними ділянками), табл. 2:**

Таблиця 2

**Маршрут Чикаго (ІЛ) – Конкорд (NH)**

Параметри	Значення
1	2
Маршрут	Через I-90 → Ohio Turnpike → New York Thruway
Відстань	~964 милі (≈1 550 км)
Час у дорозі	16–17 год без зупинок; 18–22 год з урахуванням трафіку

Продовження таблиці 2

1	2
Рельєф	Переважно рівнинний; легкі горбистості ближче до Нью-Гемпшира
Трафік	Високий у зонах Buffalo–Rochester та біля Нью-Йорка
Зони відпочинку	Численні (особливо на I-90/I-80), напр. Oasis біля Чикаго

Фінансові розрахунки, табл. 3:

Таблиця 3

Стаття витрат	Розрахунок	Сума (USD)	Сума (грн)
Пальне	964 / 6,5 = 148 гал. × \$ 3,90	\$ 577,20	≈ 23 545 грн
Платні дороги (tolls)	Skyway + Indiana + Ohio + NY Thruway	~\$ 85,00	≈ 3468 грн
Оплата водієві	964 × \$ 0,62	\$ 597,68	≈ 24 400 грн

Загальні витрати | | \$1 259,88 | ≈ 51 400 грн | (за середнім курсом \$1 ≈ 40,80 грн).

У ході реалізації основних етапів методу аналітичної ієрархії Т. СААТІ одержано такі результати.

Побудована матриця попарних порівнянь ефективності маршруту.

Для десяти зазначених вище чинників проведені попарні порівняння за шкалою Сааті (від 1 до 9 або їх обернених значень).

Обчислені вагові коефіцієнти та виконана перевірка узгодженості.

Формула інтегрального показника (1)

$$S = 0,0697 \cdot N_1 + 0,0507 \cdot N_2 + 0,0417 \cdot N_3 + 0,2249 \cdot N_4 + 0,3085 \cdot N_5 + \\ + 0,0388 \cdot N_6 + 0,0289 \cdot N_7 + 0,0296 \cdot N_8 + 0,0285 \cdot N_9 + 0,1787 \cdot N_{10}$$

де  $N_i$  – нормалізовані чинники за формулами (2), (3).

**1. Найвпливовіші критерії:** використання вантажності (30,85 %), рентабельність (22,49 %), ефективність автопоїзда (17,87 %).

Перевірка виконання умови узгодженості оцінок експертів за допомогою індексу узгодженості для уникнення суперечливих рішень зроблена за такими формулами.

Індекс узгодженості (CI):

$$CI = (\lambda_{\max} - n) / (n - 1), \quad (6)$$

Відношення узгодженості (CR):

$$CR = CI / R, \quad (7)$$

де випадковий індекс узгодженості  $RI = 1,49$  при  $n = 10$ . Матриця попарних порівнянь вважається добре узгодженою, якщо  $CR \leq 0,1$ .

Логічно узгоджена матриця попарних порівнянь з урахуванням важливості критеріїв подана у табл. 4.

Таблиця 4

Критерій	Вартість	Час	Ризики	Рентабельність	Використання в.	Зони інг. руху	Мости / тунелі	Перепади висот	Повороти	Ефективність
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Вартість	1	2	3	1/5	1/7	3	3	2	3	1/6
Час	1/2	1	2	1/6	1/6	2	2	2	2	1/7

Продовження таблиці 4

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Ризики	1/3	1/2	1	1/7	1/7	2	2	2	2	1/6
Рентабельність	5	6	7	1	1/3	6	5	6	5	3
Використання вантажо- підйомності	7	6	7	3	1	5	6	7	6	4
Зони інтенсивності руху	1/3	1/2	1/2	1/6	1/5	1	2	2	2	1/5
Мости/тунелі	1/3	1/2	1/2	1/5	1/6	1/2	1	1	1	1/6
Перепади висот	1/2	1/2	1/2	1/6	1/7	1/2	1	1	1	1/5
Повороти	1/3	1/2	1/2	1/5	1/7	1/2	1	1	1	1/6
Ефективність автопоїзда	6	7	6	1/3	1/4	5	6	5	6	1

## 2. Реалізація перевірки узгодженості:

Наведемо оцінки максимального значення власних чисел  $\lambda_{\max}$  матриці порівнянь та індексу узгодженості  $CI$ :  $\lambda_{\max} = 10,61$ ;

$$CI = (\lambda_{\max} - n) / (n - 1) = (10,61 - 10) / 9 = 0,619 = 0,068.$$

Числове значення відношення узгодженості  $CR$ :

$$CR = CI / RI = 0,068 / 1,49 = 0,046.$$

## 3. Висновок по узгодженості:

$CR = 0,046 < 0,1$  – матриця попарних порівнянь достатньо узгоджена. Використано отримані ваги для обчислення інтегрального індексу.

Інтегральний індекс ефективності маршруту обчислений за формулою (1):  $E = 0,666$ .

• Для матриці попарних порівнянь отримано  $CR = 0,046 < 0,1$ , отже, оцінки узгоджені.

• Ваги критеріїв розраховані.

• Інтегральний індекс ефективності маршруту № 1 становить **0,666** (з 0 до 1) – досить високий показник ефективності з урахуванням параметрів маршруту.

Розрахунки інтегральних показників ефективності маршрутів № 2, № 3, № 4 виконано за алгоритмом, який використано для розрахунку маршруту № 1. **Реальні вихідні параметри маршруту № 2 (I-80 → Interstate 76 → I-95/I-93), табл. 5.**

Таблиця 5

Параметри	Значення
Відстань	~960–970 миль ( $\approx$ 1 545–1 560 км)
Час у дорозі	~21–22 год (через трафік у Філадельфії, Ньюарку, Бостоні)
Платні дороги (tolls)	• Indiana Toll Road – \$ 15,50 • Ohio Turnpike – \$ 16,50 • NJ/PA Turnpike – \$ 25–28
Трафік	Інтенсивний, особливо у містах Пенсильванії, Нью-Джерсі
Рельєф	Загалом рівнинний, із пагорбистими ділянками в Пенсильванії
Зони з високою інтенсивністю руху	~60 км (густі затори у мегаполісах)
Кількість мостів / тунелів з обмеженнями	4
Сумарні перепади висоти	Орієнтовно 300 м
Кількість складних поворотів	Близько 12
Ефективність автопоїзда	Константа: 0,8 (Freightliner Cascadia 2023)

**Висновок.** Інтегральний показник ефективності маршруту № 2 дорівнює **0,659** (за шкалою від 0 до 1).

Це трохи нижче, ніж для маршруту № 1 (0,666), що відображає більший час, інтенсивність руху і платню за дорогу.

Маршрут № 2 дещо менш ефективний за критеріями, але все одно має доволі високий індекс ефективності (за шкалою від 0 до 1).

**Вхідні параметри маршруту № 3 (через Pittsburgh PA), табл. 6.**

Таблиця 6

Параметри	Значення
Відстань	~990 миль (≈1 593 км)
Час у дорозі	~19–23 год (через рельєф і затори в Cleveland, Pittsburgh)
Платні дороги (tolls)	• Ohio Turnpike – ~\$ 16,50 • Pennsylvania Turnpike (через Pittsburgh) – ~\$ 24–28
Трафік	Інтенсивний у Cleveland та Pittsburgh, можливі затримки
Рельєф	Хвилеподібна гірська місцевість, яка ускладнює рух
Зони відпочинку	Достатньо, але комфорт залежить від складного рельєфу

**Відповідь:**

Інтегральний показник ефективності маршруту № 3 дорівнює **0,634** (за шкалою від 0 до 1).

Це означає, що маршрут є доволі ефективним, хоча й дещо програє маршрутам № 1 (0,666) та № 2 (0,659) через більші перепади висот, можливі затори та час у дорозі. Вартість маршруту вважаємо максимальною через найбільші витрати на пальне та платні дороги.

**Маршрут № 4: Альтернативний маршрут без платних доріг (через локальні/міські ділянки)**

Таблиця 7

Параметри	Значення
Вартість (тільки пальне)	≈ \$ 700 (через об'їзди та довший маршрут)
Платні дороги	Відсутні (плата \$ 0)
Час у дорозі	~22 год (через міські ділянки та обмеження швидкості)
Рентабельність	0,55 (знижена через вищі витрати часу / пального)
Використання вантажопідйомності	0,85
Зони з високою інтенсивністю руху	~65 км (через більшу урбанізованість маршруту)
Кількість мостів/тунелів з обмеженнями	4
Перепади висоти	~350 м (через подрібнений рельєф та об'їзди)
Кількість складних поворотів	~15 (через місцеві дороги та об'їзди)
Ефективність автопоїзда	0,8 (Freightliner Cascadia 2023, як і в інших маршрутах)

**Результат:** Інтегральний показник ефективності маршруту № 4 дорівнює ≈ 0,648 (за шкалою від 0 до 1).

**Отже, встановлено:**

1. Найефективнішим за сукупністю критеріїв (індекс 0,666) є маршрут № 1 (чітка магістраль, оптимальний трафік/відстань, хоч і присутні платні дороги).
2. Маршрут № 4 (повністю без платних доріг) демонструє досить високу ефективність (0,648), хоч дещо поступається маршрутам із магістральними платними сегментами через довший час та підвищене навантаження на локальні дороги.
3. Маршрут № 3 найменш ефективний (0,634) через найбільші витрати на паливе, перепади висот, об'їзди та затори біля Піттсбурга.
4. Якщо найголовніші критерії для компанії – це відсутність додаткових витрат на tolls та юридична коректність вантажного руху, маршрут № 4 є оптимальним.
5. Якщо ключовими є оперативність, прогнозованість часу доставки й зручності для великого автопоїзда, більш вигідні маршрути № 1 та № 2 (але з витратами на платні дороги).

Таблиця 8

**Порівняльна таблиця елементів та інтегральних показників ефективності для чотирьох маршрутів вантажних перевезень у США**

Критерій / Маршрут	№ 1 (I-90 з tolls)	№2(I-80/I-76, частково toll)	№ 3 (I-90 через Pittsburgh)	№ 4 (Toll-free truck-legal)
Вартість (\$)	662,20	633,20	1000 (максимум)	700
Час (години)	20	21	21	22
Платня / ризики (\$)	85	56	45	0
Рентабельність (0–1)	0,6	0,6	0,6	0,55
Використання вантажопідйомності (0–1)	0,85	0,85	0,85	0,85
Зони з високою інтенсивністю руху (км)	50	60	55	65
Кількість мостів / тунелів	3	4	4	4
Перепади висот (м)	200	300	350	350
Кількість складних поворотів	10	12	12	15
Ефективність автопоїзда (0–1)	0,8	0,8	0,8	0,8
<b>Нормоване значення індексу ефективності (0–1)</b>	0,666	0,659	0,634	0,648

Аналіз порівняльної таблиці (табл. 8) дозволяє стверджувати таке:

1. *Застосування методу аналізу ієрархії Саати (АНР)* забезпечує формалізацію процесу прийняття рішень у виборі маршруту, дозволяючи поєднати кількісні та якісні критерії в єдину інтегральну оцінку ефективності.
2. *Порівняльна оцінка чотирьох маршрутів між Чикаго (IL) і Конкордом (NH)* демонструє, що маршрут із платними дорогами (№ 1) виявився найефективнішим (індекс **0,666**), оскільки забезпечує найкраще співвідношення витрат, часу та логістичної зручності. Альтернативний маршрут без платних доріг (№ 4) показав доволі високу ефективність (**0,648**), що робить його доцільним за умов обмеженого бюджету або необхідності уникнення toll-зон.
3. *Виявлено ключові проблеми*, що обмежують точність і адаптивність маршрутного планування: недостатність якісних даних, ігнорування погодних і дорожніх чинників, низький рівень цифровізації процесів.

4. *Запропонована експертно-функціональна модель* ефективності маршрутів з використанням нормування та АНР є придатною для впровадження у системах логістичного планування транспортних компаній.

#### **Висновок**

Розроблена концепція побудови експертно-функціональної моделі оцінки ефективності маршрутів дизельних автопоїздів з урахуванням енергетичної, транспортної та дорожньої ефективності засобів перевезень дає змогу здійснити комплексну оцінку ефективності маршрутів дизельних автопоїздів, інтегруючи критерії енергетичної, транспортної та дорожньої ефективності; ранжувати маршрути дизельних автопоїздів за інтегральним показником ефективності, а також обґрунтувати вибір оптимальних маршрутів з урахуванням інтегральної ефективності засобів перевезень.

Запропонована концепція експертно-функціональної моделі ефективності маршрутів з використанням нормування та АНР може бути впровадженою у системах логістичного планування транспортних компаній.

#### **ЛІТЕРАТУРА**

1. Lumenalta. What is freight routing? Guide to efficient routing, types, and benefits for logistics optimization. URL: <https://lumenalta.com/insights/what-is-freight-routing> (дата звернення: 31.07.2025).
2. Мигаль В.Д. Інтелектуальні системи в технічній експлуатації автомобілів : монографія. Харків, 2018. 262 с.
3. McKinnon A. Performance measurement in freight transport: its contribution to the design, implementation and monitoring of public policy. *International Transport Forum Discussion Paper*. 2015. No. 2015-07.
4. Freight Transport and Logistics Masterplan. Federal Ministry for Digital and Transport (BMDV). 2023.
5. Baran J. The efficiency of the road transport sector in Poland and other member states of the European Union. *Scientific Journal of Siedlce University of Natural Sciences and Humanities. Administration and Management Series*. 2014. No. 103. P. 175–201.
6. Woodburn A. An analysis of rail freight operational efficiency and mode share in the British port-hinterland container market : dissertation. London, 2015.
7. Giuliano G., Kang S., Hegde S. Assessment of Freight System Efficiency Measure: GDP/GHG. URL: <https://dot.ca.gov/-/media/dot-media/programs/research-innovation-system-information/documents/final-reports/ca18-3081-final-report-all.pdf> (дата звернення: 31.07.2025).
8. Beeontrade. Ocean Freight Charges: Factors, Formulas, and Examples. URL: <https://www.beeontrade.com/blog/how-to-calculate-ocean-freight-charges-factors-formulas-and-real-life-examples> (дата звернення: 31.07.2025).
9. HSE Network. Top 10 Route Optimisation Software Providers in 2025. URL: <https://www.hse-network.com/top-10-route-optimisation-software-providers/> (дата звернення: 31.07.2025).

10. Sustainability Directory. Route Efficiency → Term. URL: <https://sustainability-directory.com/term/route-efficiency/> (дата звернення: 31.07.2025).
11. Reinberg S., Torrado López E. Multi-Criteria Decision Making for International Freight Transportation. Uppsala, 2024. URL: <https://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:1874953/FULLTEXT01.pdf> (дата звернення: 31.07.2025).
12. NetworkON. Route Optimization Software for Efficient Logistics. URL: <https://networkon.io/resources/blog/route-optimization-software/> (дата звернення: 31.07.2025).
13. Route4Me. Route4Me Route Planner on the App Store. URL: <https://apps.apple.com/us/app/route4me-route-planner/id349853799> (дата звернення: 31.07.2025).
14. Seiford L.M., Thrall R.M. Components of efficiency evaluation in data envelopment analysis. *European Journal of Operational Research*. 1994. Vol. 80. No. 3. P. 500–509. DOI: [https://doi.org/10.1016/0377-2217\(94\)00131-U](https://doi.org/10.1016/0377-2217(94)00131-U).
15. Rahman M. Comparative analysis of AHP and TOPSIS methods in retail business location selection decision support system. *Journal Electrical and Computer Experiences*. 2024. Vol. 2. No. 2. P. 52–57. URL: <https://jurnal.tintaemas.id/index.php/jece/article/download/355/285/2585> (дата звернення: 31.07.2025).
16. Приходько В. Оцінювання енергоефективності сучасних автопоїздів для міжнародних вантажних перевезень. *Сучасні технології в машинобудуванні та транспорті*. Луцьк : ЛНТУ, 2025. С. 355–366.
17. Приходько В.Е. Знаходження інтегрального індексу енергетичної і транспортної ефективності для підвищення функціонування одноланкових автопоїздів у міжнародному сполученні. *Вісник ХНТУ*. 2025. С. 26–41.
18. Вікович І., Приходько В. Побудова інтегрального індексу енергетичної і транспортної та дорожньої ефективності автопоїздів для міжнародних вантажних перевезень. *Вісник ВНТУ*. 2025. № 5. С. 145–152.
19. Вікович І.А., Обшта А.Ф., Приходько В.Е. Економічна ефективність вантажних перевезень одноланковими автопоїздами в транспортних коридорах США. *Вчені записки ТНУ імені В. І. Вернадського. Серія: Технічні науки*. 2025. Том 36 (75). № 4. С. 280–286.

## REFERENCES

1. Lumenalta. (n.d.). *What is freight routing? Guide to efficient routing, types, and benefits for logistics optimization*. Retrieved July 31, 2025, from: <https://lumenalta.com/insights/what-is-freight-routing>.
2. Myhal, V.D. (2018). *Intelligent systems in the technical operation of automobiles: A monograph* [Інтелектуальні системи в технічній експлуатації автомобілів: Монографія]. Kharkiv: Maidan [in Ukrainian].

3. McKinnon, A. (2015). Performance measurement in freight transport: Its contribution to the design, implementation and monitoring of public policy. *International Transport Forum Discussion Paper*, No. 2015-07.
4. Federal Ministry for Digital and Transport. (2023). *Freight transport and logistics masterplan*.
5. Baran, J. (2014). The efficiency of the road transport sector in Poland and other member states of the European Union. *Scientific Journal of Siedlce University of Natural Sciences and Humanities. Administration and Management Series*. (103). 175–201.
6. Woodburn, A. (2015). *An analysis of rail freight operational efficiency and mode share in the British port-hinterland container market*: Master's thesis, University of Westminster.
7. Giuliano, G., Kang, S., & Hegde, S. (2021). *Assessment of freight system efficiency measure: GDP/GHG*. California Department of Transportation. July 31 2025. URL: <https://dot.ca.gov/-/media/dot-media/programs/research-innovation-system-information/documents/final-reports/ca18-3081-final-report-all.pdf>
8. Beeontrade. (2023, April 28). *Ocean freight charges: Factors, formulas, and examples*. July 31 2025. URL: <https://www.beeontrade.com/blog/how-to-calculate-ocean-freight-charges-factors-formulas-and-real-life-examples>
9. HSE Network. (2025, March 11). *Top 10 route optimisation software providers in 2025*. July 31 2025. URL: <https://www.hse-network.com/top-10-route-optimisation-software-providers/>
10. Sustainability Directory. (2025, April 4). *Route efficiency → Term*. July 31 2025. URL: <https://sustainability-directory.com/term/route-efficiency/>
11. Reinberg, S., & Torrado López, E. (2024). *Multi-criteria decision making for international freight transportation*. Uppsala University. July 31 2025. URL: <https://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:1874953/FULLTEXT01.pdf>
12. NetworkON. (2025, February 11). *Route optimization software for efficient logistics*. July 31 2025. URL: <https://networkon.io/resources/blog/route-optimization-software/>
13. Route4Me. (2021). *Route4Me Route Planner on the App Store*. July 31 2025. URL: <https://apps.apple.com/us/app/route4me-route-planner/id349853799>
14. Seiford, L.M., & Thrall, R.M. (1994). Components of efficiency evaluation in data envelopment analysis. *European Journal of Operational Research*, 80 (3). 500–509. DOI: [https://doi.org/10.1016/0377-2217\(94\)00131-U](https://doi.org/10.1016/0377-2217(94)00131-U).
15. Rahman, M. (2024). Comparative analysis of AHP and TOPSIS methods in retail business location selection decision support system. *Journal of Electrical and Computer Experiences*. 2 (2). 52–57. July 31, 2025. URL: <https://jurnal.tintaemas.id/index.php/jece/article/download/355/285/2585>.
16. Prykhodko, V. (2025). Assessment of Energy Efficiency of Modern Road Trains for International Freight Transportation. *Modern Technologies in Mechanical Engineering and Transport*. Lutsk : LNTU. Pp. 355–366.

17. Prykhodko, V.E. (2025). Determining the Integral Index of Energy and Transport Efficiency to Improve the Operation of Single-Link Road Trains in International Transport. *KhNTU Bulletin*. 26–41.
18. Vikovych, I., Prykhodko, V. (2025). Development of an Integral Index of Energy, Transport, and Road Efficiency of Road Trains for International Freight Transportation. *VNTU Bulletin*. 5. 145–152.
19. Vikovych, I.A., Obshta, A.F., Prykhodko, V.E. (2025). Economic Efficiency of Freight Transportation by Single-Link Road Trains in U.S. Transport Corridors. *Scientific Notes of V.I. Vernadsky TNU. Series: Technical Sciences*. 36 (75). No. 4. 280–286.

Дата першого надходження статті до видання: 20.10.2025

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 21.11.2025

Дата публікації (оприлюднення) статті: 26.12.2025