

## КОМПЛЕКСНА ОЦІНКА ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ МІСЬКОГО ПАСАЖИРСЬКОГО ТРАНСПОРТУ

*Костьян Н.Л.*, кандидат технічних наук, Черкаський державний технологічний університет, Черкаси, Україна, 438knl@gmail.com, orcid.org/ 0000-0002-1599-4007

### COMPLEX ENERGY EFFICIENCY EVALUATION OF URBAN PASSENGER TRANSPORT

*Kostian N.L.*, Ph.D in Technical Science, Cherkasy State Technological University, Cherkasy, Ukraine, 438knl@gmail.com, orcid.org/ 0000-0002-1599-4007

#### **Постановка проблеми.**

Глобальні світові екологічні проблеми вимагають знаходження нових прогресивних шляхів та технологій щодо оптимізації параметрів складних систем у різних секторах народного господарства, в тому числі пов'язаних, напряду або опосередковано, з організацією автомобільних перевезень. Кількість викидів шкідливих речовин у повітря є прямо пропорційною до витрат палива. Порівняно з іншими видами транспортних засобів автомобільний транспорт становить найбільшу загрозу для екологічної рівноваги. Щорічне зростання мобільності населення спричиняє збільшення обсягу пасажирських перевезень, основна частка яких здійснюється у міському сполученні [1]. Це, серед іншого, актуалізує питання ефективного споживання палива громадським транспортом. Для підвищення енергоефективності міського пасажирського транспорту можна застосовувати групи технологій відповідно до етапів життєвого циклу автомобіля, зокрема на етапах проектування, виробництва та експлуатації. Даний підхід забезпечує реалізацію адекватних конструктивних, технологічних та організаційних рішень через модернізацію або оновлення парку транспортних засобів. Даний процес відбувається не хаотично. Йому передують процеси оцінювання та аналізу показників існуючої транспортної системи, їх прогнозування на майбутнє та синтез альтернативних структур, ефективних з точки зору енергозбереження та екобезпеки.

#### **Аналіз останніх досліджень і публікацій.**

Вибір транспортного засобу (ТЗ) повинен ґрунтуватись на порівнянні ефективності можливих альтернатив. Авторами [2] наведено структуру комплексного критерію ефективності експлуатації автомобілів, що формується з множини оцінок їх економічної, технічної та екологічної ефективності. Незважаючи на те, що переважна кількість наукових робіт у даній галузі присвячена оцінюванню економічної ефективності, дві інші складові також є вагомими, оскільки дозволяють оцінити ступінь адаптованості ТЗ до заданих умов експлуатації [2]. Окремо, в межах технічної складової, виділено критерії ефективності за абсолютними та питомими енерговитратами автомобіля. Для ТЗ довільної категорії традиційно оцінюють контрольну витрату палива на 100 км в процесі руху по прямій горизонтальній дорозі за заданих значень швидкості на вищій передачі [3]. Проте, даний показник не дозволяє оцінити залежність паливної економічності автомобіля від його корисного навантаження та інших чинників. Питання щодо сучасних методик та технологій оцінювання та підвищення енергоефективності ТЗ досліджено в роботах В.П. Волкова [3], Р.А. Хабутдінова [1, 4-7], І.І. Гальони [4, 6, 8], Jaehyuk Lim [9], М. Смешка [10-12], В.П. Матейчика [11-13], К. Ahn [14], Н. Rakha [15] та ін. В роботі [4] пропонується методика обґрунтованого вибору автомобіля на основі відповідної цільової функції, що враховує залежності його транспортної ефективності від зміни конструктивно-технічних, експлуатаційних та дорожніх умов транспортних операцій. У зазначеній статті наведено схему методології управління енергоресурсною ефективністю автомобіля в його життєвому циклі. Згідно з даною концепцією в дослідженнях [5-7] застосовано показники енергетичної ефективності, технологічної енергоефективності та комплексний показник техніко-енергетичної і транспортної енергоефективності автомобіля відповідно. Математичні моделі зазначених показників містять енергетичний/паливний коефіцієнт пробігу, метод визначення якого базується на порівнянні енерговіддачі/паливовіддачі заданого та еталонного автомобілів при виконанні тестової та еталонної транспортних операцій. Крім того, комплексний показник у дослідженні [7] враховує структурно-параметричну організацію конструкції автомобіля та властивості дороги. Проте, дані показники ефективності спираються на середнє (для тестової операції) та сталє задане (для еталонної операції) значення швидкості руху, а їх окремі складові потребують визначення дев'яти коефіцієнтів, що враховують специфіку різних ТЗ та видів тестових операцій. Автором [1] запропоновано комплекс

показників, що відображають залежності енергоефективності міського автобусу від довжини перегону, коефіцієнта статичного використання пасажиромісткості та максимальної потужності двигуна. В роботах [4, 8] наводяться практичні результати дослідження динаміки змін енергетичної ефективності автомобілів залежно від їхньої потужності. В дослідженні [9] в якості параметру ефективності приймають оцінку паливної економічності, яку визначають як відношення довжини пробігу до витрати палива. Але така оцінка не характеризує вплив завантаженості ТЗ. Авторами [10] у загальному вигляді описано функціональну залежність показника енергоефективності ТЗ від вісімнадцяти параметрів, що відповідають функціональним ознакам автомобіля, транспортного потоку, дороги та середовища руху як складових міської транспортної системи. Для ідентифікації лінійних та нелінійних форм даної залежності необхідним є розробка методики для формування масиву експериментальних значень енергоефективності, що розраховуються за частковими параметрами системи на основі даних спостережень.

Моделі енергоефективності ТЗ вимагають адекватного оцінювання енерговитрат у процесі їхньої експлуатації. В роботі [11] запропоновано нелінійну модель для визначення витрати палива міського пасажирського транспорту на заданому перегоні з урахуванням середньодобової потужності пасажиропотоку та виконаної на даному перегоні транспортної роботи. Авторами [12] витрата палива міського автобуса визначається за методом VSP, що базується на визначенні індексу, на який впливає аеродинамічний опір, опір коченню, градієнт дороги, швидкість та змінне навантаження на автобус. У роботах [13-15] для визначення витрати палива ТЗ застосовано поліноміальну, логарифмічну та експоненціальну форми аналітичних залежностей з урахуванням його миттєвої швидкості та режимів руху. В [15] акцентовано увагу на тому, що для досягнення високої точності обчислень доцільним є розрахунок витрати палива ТЗ на окремих сегментах маршруту та агрегація отриманих результатів.

За результатами аналізу останніх публікацій можна стверджувати, що на сьогоднішній день залишається актуальним питання розробки та реалізації методик комплексного оцінювання енергоефективності автомобільних ТЗ на основі їхніх експлуатаційних характеристик. Зважаючи на наведені результати останніх досліджень за даним напрямом, необхідно врахувати найбільш вагомі з них при оцінюванні енергоефективності міського пасажирського транспорту.

#### **Мета і завдання дослідження.**

Метою дослідження є визначення комплексної оцінки енергоефективності міського автобуса громадського користування із врахуванням його експлуатаційних характеристик.

Для досягнення поставленої мети сформульовано наступні завдання:

- формування комплексного показника енергоефективності пасажирського транспорту;
- моніторинг експлуатаційних характеристик міського автобуса в процесі руху за заданим маршрутом;
- визначення окремих складових показника енергоефективності автобуса на заданому перегоні;
- визначення комплексного показника енергоефективності міського автобуса на перегоні.

#### **Виклад основного матеріалу.**

Одним із шляхів покращення екологічної ситуації в міському середовищі за рахунок зменшення витрат палива ТЗ є мотивація мешканців міста щодо вибору громадського транспорту [12]. При цьому, комплексний критерій енергоефективності ТЗ у загальному вигляді можна записати наступним чином:

$$LEE = \sum_{i=1}^n (w_i \times E_i) \rightarrow \max, \quad (1)$$

де  $LEE$  – комплексний показник енергоефективності ТЗ;  $E_i$  –  $i$ -та часткова оцінка енергоефективності ТЗ;  $w_i$  – вага  $i$ -ї оцінки;  $n$  – кількість часткових оцінок у складі комплексного показника.

Складні умови роботи міського пасажирського транспорту обумовлені постійними змінами режимів руху в їздовому циклі, що істотно впливає на витрати палива. Крім того, зміна потужності пасажиропотоку на перегонах міських маршрутів вимагає врахування даного фактору при виборі ефективного ТЗ. Оцінювання енергоефективності пасажирського транспорту можна проводити в двох напрямках: співставленням витраченої енергії та корисної роботи за заданої довжини пробігу та через порівняння енерговитрат досліджуваного автомобіля за реальних умов руху і базового автомобіля за еталонних умов. У межах даного дослідження, приймаємо, що дані оцінки для громадського транспорту є однаково вагомими. Тому пропонується наступна форма представлення комплексного показника енергоефективності ТЗ:

$$LEE = 0,5 \cdot E_1(A_{useful}, E) + 0,5 \cdot E_2(E_0, E), \quad (2)$$

де  $E_1(A_{useful}, E)$  – оцінка механічної ефективності системи приводу [12];  $E_2(E_0, E)$  – оцінка енергетичної ефективності ТЗ;  $A_{useful}$  – корисна робота, що виконана ТЗ, МДж;  $E$  – енергія, що витрачена ТЗ, МДж;  $E_0$  – енергія, що витрачена двигуном при заданому режимі руху базового ТЗ по горизонтальній дорозі при помірних погодних умовах, МДж.

Дане дослідження є продовженням роботи [11] та проведено на прикладі автобуса великого класу Mercedes-Benz O530 на лінії міського маршруту № 13 м. Жешув, Польща. Вимірювання експлуатаційних характеристик автобуса здійснювалось протягом 25 робочих днів із використанням інтелектуального трекера Teltonika FMB920. Автобусний маршрут складається з 34 (37) перегонів у прямому (зворотному) сполученні.

Для аналізу енергоефективності на окремому перегоні ТЗ необхідно визначити часткові оцінки комплексного показника. Введемо позначення:  $E_1(A_{useful}, E) = E_1$ ;  $E_2(E_0, E) = E_2$ . Тоді

$$E_1 = \frac{\sum_{j=1}^n A_{useful_j}}{E} = \frac{10^{-6} \cdot \int_0^L (P_{\psi} + P_w + P_{jx}) dl}{\rho \cdot Q \cdot LHV}, \quad (3)$$

де  $A_{useful_j}$  – корисна робота при проходженні  $j$ -ї ділянки перегону, МДж;  $E$  – витрачена енергія на перегоні, МДж;  $n$  – кількість ділянок на перегоні;  $P_{\psi}$  – сила опору дороги, Н;  $P_w$  – сила опору повітря, Н;  $P_{jx}$  – сила інерції ТЗ, Н;  $L$  – довжина перегону, м;  $\rho$  – густина дизельного палива, при  $T > 0^{\circ} \text{C}$   $\rho = 0,86 \text{ кг} \cdot \text{дм}^{-3}$ ;  $Q$  – витрата палива, л (дм<sup>3</sup>);  $LHV$  – нижча теплота згоряння, для дизельного палива  $LHV = 42,3 \text{ МДж} \cdot \text{кг}^{-1}$ .

Застосувавши залежність для оцінки витрати палива, що було отримано в дослідженні [11], формулу (3) стосовно до міського автобуса великого класу можна записати у вигляді (4):

$$E_1 = \frac{10^{-6} \cdot \int_0^L (0,5 \cdot c_x \cdot \rho_w \cdot F \cdot V^2 + (m_0 + m_p \cdot H) \cdot (g \cdot (f \cdot \cos \alpha \pm \sin \alpha) + a)) dl}{36,378 \text{ [МДж} \cdot \text{л}^{-1}] \cdot \left( \frac{0,45699 \text{ [л} \cdot \text{км}^{-1}]}{H_{avg}} - 0,00075 \text{ [л} \cdot (\text{пас} \cdot \text{км})^{-1}] \right) \cdot H \cdot 10^{-3} \cdot L}, \quad (4)$$

де  $V$  – швидкість автобуса, м·с<sup>-1</sup>;  $a$  – прискорення автобуса, м·с<sup>-2</sup>;  $F$  – лобова площа автобуса, м<sup>2</sup>, для Mercedes-Benz O530  $F = 6,5 \text{ м}^2$ ;  $m_0$  – споряджена маса автобуса,  $m_0 = 10700 \text{ кг}$ ;  $m_p$  – середня маса пасажирів, кг;  $H$  – потужність пасажиропотоку на перегоні, пас.;  $H_{avg}$  – середня потужність пасажиропотоку за день спостереження, пас.;  $g$  – прискорення вільного падіння, м·с<sup>-2</sup>;  $f$  – коефіцієнт опору коченню;  $c_x$  – коефіцієнт аеродинамічного опору, для автобуса приймаємо 0,75 [3];  $\rho_w$  – густина повітря, кг·м<sup>-3</sup>;  $\alpha$  – кут величини ухилу дороги.

Характер зміни потужності пасажиропотоку на фіксованій послідовності перегонів у різну пору доби є схожим. Тому для оцінювання енергоефективності на окремих перегонах розглядався часовий інтервал з 6:30 до 9:30. Як приклад, розраховано часткову енергоефективність  $E_1$  автобуса для типового робочого дня (11/03/2022 р.) в часовому інтервалі з 9 год. 24 хв. по 9 год. 27 хв. Дату було обрано за найбільшою відносною частотою розподілу значень добового обсягу перевезених пасажирів. Вимірювання параметрів здійснювалось на перегоні довжиною 1064 м між зупинними пунктами № 2 та № 3 прямого маршруту з нульовим ухилом дороги. Параметри погодних умов визначено за даними Інтернет-сервісу Gismeteo. За температури повітря 0 °C та барометричного тиску 100,792 кПа, що спостерігалось в зазначений день, густина повітря  $\rho_w = 1,2877 \text{ кг} \cdot \text{м}^{-3}$ . Коефіцієнт  $f$  за заданих умов дорівнює 0,01. Середньодобова потужність пасажиропотоку  $H_{avg} = 10,18 \text{ пас}$ .

На момент прибуття автобуса до зупинки № 3 в ньому перебували 7 пасажирів. Середня маса пасажирів  $m_p$  на маршрутах даного міста приймається 55 кг [12]. Тому остаточно для даного конкретного перегону значення  $E_1$  в фіксований момент часу визначається за виразом (5):

$$E_1 = \frac{10^{-6} \cdot \int_0^L (3,13876875 \text{ [кг} \cdot \text{м}^{-1}] \cdot V^2 + 11085 \text{ [кг]} \cdot (0,0981 \text{ [м} \cdot \text{с}^{-2}] + a)) dl}{11,959998 \text{ [МДж]}}, \quad (5)$$

Вихідні дані та результати розрахунку корисної роботи при проходженні автобусом Mercedes-Benz O530 заданого перегону досліджуваного маршруту з інтервалом в 1 с наведено в таблиці 1.

Таблиця 1 – Фрагмент масиву результатів розрахунку корисної роботи на відрізках перегону  
Table 1 – The array fragment of the calculation results of the useful work on the haul sections

Час вимірювання год.: хв.:сек	Довгота	Широта	Швидкість $V, \text{ м}\cdot\text{с}^{-1}$	Прискорення $a, \text{ м}\cdot\text{с}^{-2}$	Відстань $l, \text{ м}$	Корисна робота $A_{useful}, \text{ МДж}$
09:24:12	50,030628	21,976798	1,429281	1,42928	1,42928	0,024208
09:24:13	50,030628	21,976798	2,039503	0,61022	2,03950	0,016040
09:24:14	50,030630	21,976698	2,039503	0,00000	2,03950	0,002244
09:24:15	50,030635	21,976656	2,903444	0,86394	2,90344	0,031040
09:24:16	50,030635	21,976656	3,829806	0,92636	3,82981	0,043668
09:24:17	50,030646	21,976598	3,444778	-0,38503	3,44477	-0,010828
09:24:18	50,030670	21,976545	3,802222	0,35744	3,80223	0,019373
09:24:19	50,030703	21,976493	4,890889	1,08867	4,89089	0,064708
09:24:20	50,030741	21,976460	5,126972	0,23608	5,12698	0,019416
09:24:21	50,030786	21,976430	5,531667	0,40469	5,53166	0,031362
09:24:22	50,030833	21,976406	5,755778	0,22411	5,75577	0,021156
09:24:23	50,030891	21,976383	6,347167	0,59139	6,34717	0,049314
09:24:24	50,030948	21,976380	6,885028	0,53786	6,88503	0,049561
09:24:25	50,031018	21,976386	7,439583	0,55456	7,43959	0,055116
09:24:26	50,031091	21,976393	7,806000	0,36642	7,80599	0,041687

Вплив прискорення автобуса на зміну значення корисної роботи на перегоні наведений на рисунку 1 та характеризується залежністю  $A_{useful}=0,0609\cdot a+0,012$  з коефіцієнтом детермінації 0,7597.

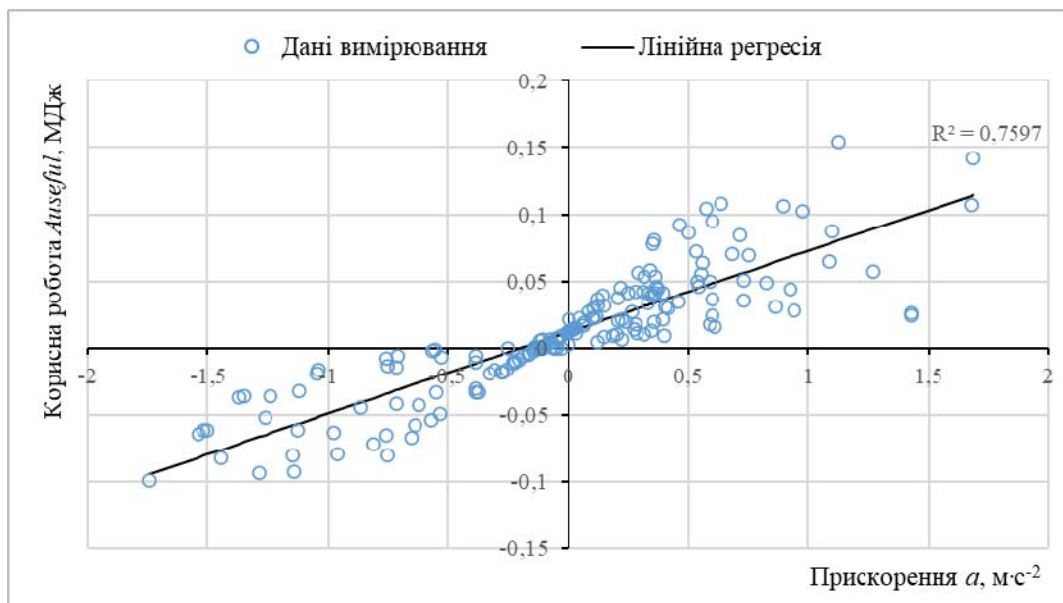


Рисунок 1 – Залежність корисної роботи на заданому перегоні маршруту від прискорення автобуса  
Figure 1 – The dependence of the useful work on a given route haul on the bus acceleration

Сумарне значення корисної роботи на перегоні  $A_{useful} = 2,065193$  МДж. Отже, значення часткової енергоефективності  $E_1$  на перегоні прямого рейсу складає 0,172675.

Залежність (3) може бути узагальнена на довжину всього маршруту наступним чином:

$$E_1(A_{useful}, E) = \frac{\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^{n_i} (A_{useful})_{ij}}{\sum_{i=1}^m E_i} = \frac{\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^{n_i} (A_{useful})_{ij}}{\sum_{i=1}^m (\rho \cdot Q_i \cdot LHV)} \quad (6)$$

де  $(A_{useful})_{ij}$  – корисна робота при проходженні  $j$ -ї ділянки  $i$ -го перегону маршруту, МДж;  $E_i$  – витрачена енергія на  $i$ -му перегоні, МДж;  $n_i$  – кількість ділянок на  $i$ -му перегоні;  $m$  – кількість перегонів;  $Q_i$  – витрата палива на  $i$ -му перегоні, л (дм<sup>3</sup>).

Виходячи з положень, що викладено в [5], та враховуючи результати дослідження [11], отримано залежність (7) для розрахунку часткової оцінки  $E_2$  комплексного показника енергоефективності автобуса великого класу:

$$E_2 = \frac{Q_0 \cdot V_{avg} \cdot \gamma_{cm}}{\left( \frac{0,45699 \left[ \text{л} \cdot \text{км}^{-1} \right]}{H_{avg}} - 0,00075 \left[ \text{л} \cdot (\text{пас} \cdot \text{км})^{-1} \right] \right) \cdot H \cdot L_r \cdot V_e \cdot (\eta_q + \gamma_{cm})}, \quad (7)$$

де  $Q_0$  – еталонна витрата палива міського автобуса великого класу на заданому перегоні (маршруті), л;  $V_{avg}$ ,  $V_e$  – середня та еталонна швидкості міського автобуса великого класу на заданому перегоні (маршруті) відповідно, км·год.<sup>-1</sup>;  $H$ ,  $H_{avg}$  – потужність пасажиропотоку на перегоні (маршруті) та середня потужність пасажиропотоку за день відповідно, пас.;  $L_r$  – довжина перегону (маршруту), км;  $\gamma_{cm}$  – коефіцієнт використання пасажиромісткості автобуса;  $\eta_q$  – коефіцієнт спорядженої маси.

Для автобуса Mercedes-Benz O530 при русі на заданому перегоні в зазначений вище проміжок часу середня швидкість  $V_{avg} = 25,56$  км/год., коефіцієнт використання пасажиромісткості в умовах обмежень, викликаних небезпекою поширення COVID-19,  $\gamma_{cm} = 0,25$ . Коефіцієнт спорядженої маси  $\eta_q = 0,14$ . Еталонна швидкість  $V_e$  приймається рівною 40 км/год [5]. За еталонну витрату палива приймається найменша витрата палива на даному перегоні протягом робочого дня,  $Q_0 = 0,187$  л. Відповідно до формули (7) значення часткової оцінки  $E_2 = 0,23282$ .

Таким чином, комплексний показник енергоефективності  $LEE$  для автобуса великого класу на заданому перегоні набуває значення 0,20. Аналітичну залежність (2) можна коригувати шляхом введення нових часткових оцінок та перерахунку вагових коефіцієнтів.

#### Висновки.

В ході дослідження експлуатаційних характеристик міського пасажирського транспорту запропоновано методику комплексного оцінювання енергоефективності міського автобуса великого класу, що базується на визначенні зважених оцінок його механічної та енергетичної ефективності. За даною методикою отримано значення комплексного показника енергоефективності дизельного автобуса на заданому перегоні досліджуваного маршруту, яке становить 0,20. Наведено узагальнену форму даного показника для міського маршруту з довільною кількістю перегонів. Розглянуту методику доцільно використовувати для порівняння автобусів з різними техніко-експлуатаційними характеристиками.

#### ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Хабутдінов, Р.А. Аналіз впливу показників транспортної енергоефективності автобуса для міських пасажирських перевезень / Р.А. Хабутдінов, І.О. Федоренко // Вчені записки ТНУ імені В.І. Вернадського. Серія: Технічні науки. – Одеса : Видавничий дім «Гельветика», 2021. – Том 32 (71) № 3. С. 259-266. DOI: 10.32838/2663-5941/2021.3/39.
2. Лук'яненко, О.Ю. Комплексна оцінка ефективності експлуатації автомобілів / О.Ю. Лук'яненко, В.Г. Тихий // Матеріали X-ої міжнародної науково-технічної інтернет-конференції «Проблеми і перспективи розвитку автомобільного транспорту», 14-15 квітня 2022 року: збірник наукових праць / МОН України, ВНТУ [та інш.]. – Вінниця : ВНТУ, 2022. – С. 206-209.
3. Волков, В.П. Теорія руху автомобіля: підручник / В.П. Волков, Г.Б. Вільський. – Суми: Університетська книга, 2021. – 320 с.
4. Хабутдінов, Р.А. Мотиваційний аналіз концептуальних прераференцій перевізника-покупця автомобіля малої вантажопідйомності за принципом життєвого циклу / Р.А. Хабутдінов, І.І. Гальона // Вісник Національного транспортного університету. – К. : НТУ, 2015. – № 1(31). – С. 525-531.
5. Хабутдінов, Р.А. Методика аналізу експлуатаційно-технологічних і енергетичних показників автопоїздів / Р.А. Хабутдінов, О.Г. Ковбасенко // Вісник НТУ. Науково-технічний збірник: в 2 ч. Ч. 1: Серія «Технічні науки». – К. : НТУ, 2014. – № 29. – С. 331-338.
6. Хабутдінов, Р. А. Підвищення споживчих властивостей автомобілів малої вантажопідйомності, як складних науково-технічних товарів / Р.А. Хабутдінов, І.І. Гальона // Вісник Національного транспортного університету. – К. : НТУ, 2011. – № 24(2). – С. 240-243.

7. Хабутдінов, Р.А. Системна концепція енергоресурсної синергії та методологія технологічно-інноваційного управління на автотранспорті / Р.А. Хабутдінов // Вісник НТУ. – К.: НТУ, 2020. – Вип. 1 (46). С. 365-374. DOI: 10.33744/2308-6645-2020-1-46-365-374.
8. Хабутдінов, Р.А. Методика аналізу впливу технічних параметрів та машинно-технологічних процедур на енергоефективність автомобілів малої вантажопідйомності / Р.А. Хабутдінов, І.І. Гальона // Вісник НТУ. – К. : НТУ, 2012. – № 26(2). – С. 300-305.
9. Jaehyuk Lim, Yumin Lee, Kiho Kim, & Jinwook Lee. Experimental Analysis of Calculation of Fuel Consumption Rate by On-Road Mileage in a 2.0 L Gasoline-Fueled Passenger Vehicle. *Appl. Sci*, 8, 2390, DOI: 10.3390/app8122390, (2018).
10. Костьян, Н.Л. До визначення продуктивності та енергоефективності транспортних засобів в умовах міської мобільності / Н.Л. Костьян, Мірослав Смешек // Вісник НТУ. – К. : НТУ, 2021. – Вип. 3(50). – 113-122.
11. Костьян, Н.Л. Оцінювання енерговитрат громадського транспорту із врахуванням потужності пасажиропотоку / Н.Л. Костьян, В.П. Матейчик, М. Смешек // Матеріали X-ої міжнародної науково-технічної інтернет-конференції «Проблеми і перспективи розвитку автомобільного транспорту», 14-15 квітня 2022 року / МОН України, ВНТУ [та інш.]. – Вінниця: ВНТУ, 2022. – С. 168-171.
12. Śmieszek, M., & Mateichyk, V. Determining the fuel consumption of a public city bus in urban traffic. In: *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, Vol. 1199. The 26th International Slovak-Polish Scientific Conference on Machine Modelling and Simulations (MMS 2021) 13th-15th September 2021, Bardejovské Kúpele, Slovak Republic, 012080. DOI: 10.1088/1757-899X/1199/1/012080, (2021).
13. М 218-02070915-694:2011 «Оцінювання інгредієнтного і параметричного забруднення придорожного середовища системою «транспортний потік-дорога». – Київ: НТУ – 77 с.
14. Ahn, K., Rakha, H., Trani, A., & Van Aerde, M. Estimating vehicle fuel consumption and emissions based on instantaneous speed and acceleration levels. *Journal of Transportation Engineering*, 128(2), p. 182-190, DOI: 10.1061/(ASCE)0733-947X(2002)128:2(182), (2002).
15. Du, J., Rakha, H. A., Filali, F., & Eldardiry, H. COVID-19 pandemic impacts on traffic system delay, fuel consumption and emissions. *International Journal of Transportation Science and Technology*, 10(2), p. 184–196, DOI: 10.1016/j.ijtst.2020.11.003, (2021).

## REFERENCES

1. Khabutdinov, R.A., & Fedorenko, I.O. (2021). Analiz vplyvu pokaznykiv transportnoi enerhoefektyvnosti avtobusa dlia miskykh pasazhyrskykh perevezhen [Analysis of the impact of transport energy efficiency indicators of the bus for urban passenger transportation]. *Vcheni zapysky TNU imeni V.I. Vernadskoho. Serii: Tekhnichni nauky – Scientific notes of V.I. Vernadsky Taurida National University. Series: Technical Sciences*, Volume 32 (71), Issue 3, 259-266 [in Ukrainian].
2. Lukyanchenko, O., & Tykhy V. (2022). Kompleksna otsinka efektyvnosti ekspluatatsii avtomobiliv [Comprehensive assessment of the efficiency of car operation]. *Materialy X-oi mizhnarodnoi naukovo-tekhnichnoi internet-konferentsii «Problemy i perspektyvy rozvytku avtomobilnoho transportu» – Materials of X-th international scientific and technical internet-conference «Problems and prospects of development automobile transport»*. (206-209). Vinnytsia: VNTU [in Ukrainian].
3. Volkov, V.P., & Vil'skyi, H.B. (2021) *Teoriia rukhu avtomobilia [Car motion theory]*. Sumy: VTD «Universytetska knyha», [in Ukrainian].
4. Khabutdinov, R.A., & Halona, I.I. (2015). Motyvatsiinyi analiz kontseptualnykh preferentsii pereviznyka-pokuptsia avtomobilia maloi vantazhopidionnosti za pryntsyptom zhyttievoho tsykladu [Motivational analysis of conceptual preferences carrier buyer light-duty vehicle on the basis of life cycle]. *Visnyk NTU – Visnyk National Transport University*, 1(31), 525-531 [in Ukrainian].
5. Habutdinov, R.A., & Kovbasenko, O.G. (2014). Metodyka analizu ekspluatatsiino-tekhnolohichnykh i enerhetychnykh pokaznykiv avtopoizdiv [Technique of the analysis of exploitation-technological and energy indexes of truck trailer]. *Visnyk Natsionalnoho transportnoho universytetu. Naukovo-tekhnichnyi zbirnyk: z v 2 ch. Ch. 1: Serii «Tekhnichni nauky» – Visnyk National Transport University. Scientific and Technical Collection: In Part 2. Part 1: Series “Technical sciences”*, 29, 331-338 [in Ukrainian].
6. Khabutdinov, R.A., & Halona, I.I. (2011) Pidvyshchennia spozhyvchykh vlastyvostei avtomobiliv maloi vantazhopidionnosti, yak skladnykh naukovo-tekhnichnykh tovariv [Improving the consumer properties of low-capacity vehicles as complex scientific and technical goods]. *Visnyk*

*Natsionalnoho transportnoho universytetu – Visnyk National Transport University*, 24(2). 240-243 [in Ukrainian].

7. Khabutdinov, R.A. (2020) Systemna kontseptsiiia enerhoresursnoi synerhii ta metodolohiia tekhnolohichno-innovatsiinoho upravlinnia na avtotransporti [System concept of energy-resource synergy and methodology of technological-innovative management on motor transport]. *Visnyk Natsionalnoho transportnoho universytetu – Visnyk National Transport University*, 1(46), 365-374 [in Ukrainian].

8. Habutdinov, R.A., & Galyona, I.I. (2012) Metodyka analizu vplyvu tekhnichnykh parametriv ta mashynno-tekhnolohichnykh protsedur na enerhoefektyvnist avtomobiliv maloi vantazhopidionnosti [Methods of analysis of the impact of technical parameters and machine-technological procedures for energy efficiency light-duty vehicles]. *Visnyk NTU – Visnyk NTU*, 26(2), 300-305 [in Ukrainian].

9. Jaehyuk Lim, Yumin Lee, Kiho Kim & Jinwook Lee. (2018) Experimental Analysis of Calculation of Fuel Consumption Rate by On-Road Mileage in a 2.0 L Gasoline-Fueled Passenger Vehicle. *Appl. Sci*, 8, 2390, DOI: 10.3390/app8122390.

10. Kostian, N.L., & Smieszek, M. (2021). Do vyznachennia produktyvnosti ta enerhoefektyvnosti transportnykh zasobiv v umovakh miskoi mobilnosti [To determining the performance and energy efficiency of vehicles in the context of urban mobility]. *Visnyk Natsionalnoho transportnoho universytetu – Bulletin of the National Transport University*, 3(50), 113-122 [in Ukrainian].

11. Kostian, N. Mateichyk, V., & Śmieszek, M. (2022). Otsiniuvannia enerhovytrat hromadskoho transportu iz vrakhuvanniam potuzhnosti pasazhyropotoku [Estimation of energy consumption of public transport taking into account the capacity of passenger traffic]. *Materialy X-oi mizhnarodnoi naukovo-tekhnichnoi internet-konferentsii «Problemy i perspektyvy rozvytku avtomobilnoho transportu» – Materials of X-th international scientific and technical internet-conference «Problems and prospects of development automobile transport»*. (168-171). Vinnytsia: VNTU [in Ukrainian].

12. Śmieszek, M., & Mateichyk, V. (2021). Determining the fuel consumption of a public city bus in urban traffic. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. The 26th International Slovak-Polish Scientific Conference on Machine Modelling and Simulations (MMS 2021) 13th-15th September 2021, Bardejovské Kúpele, Slovak Republic, (Vol. 1199)*, DOI: 10.1088/1757-899X/1199/1/012080.

13. M 218-02070915-694:2011. Oci n'uvann'a ingredientnogo i parametrichnogo zabrudnenn'a pridorozhn'ogo seredovischa sistemoyu “transportnij potik-doroga” [Evaluation ingredient and parametric roadside pollution system “traffic flow-road”]. – Kyiv. NTU, 2011. 77 [in Ukrainian].

14. Ahn, K., Rakha, H., Trani, A., & Van Aerde, M. (2002). Estimating vehicle fuel consumption and emissions based on instantaneous speed and acceleration levels. *Journal of Transportation Engineering*, 128(2), 182-190, DOI: 10.1061/(ASCE)0733-947X(2002)128:2(182).

15. Du, J., Rakha, H. A., Filali, F., & Eldardiry, H. (2021). COVID-19 pandemic impacts on traffic system delay, fuel consumption and emissions. *International Journal of Transportation Science and Technology*, 10(2), 184–196, DOI: 10.1016/j.ijtst.2020.11.003.

## РЕФЕРАТ

Костьян Н.Л. Комплексна оцінка енергоефективності міського пасажирського транспорту / Н.Л. Костьян // Вісник Національного транспортного університету. Серія «Технічні науки». Науковий журнал. – К. : НТУ, 2022. – Вип. 3 (53).

Досліджено науково-технічну задачу оцінювання та підвищення ефективності міського пасажирського транспорту за критерієм його екологічної безпеки та енерговитрат. Запропоновано комплексний показник енергоефективності, що ґрунтується на використанні зважених часткових оцінок механічної та енергетичної ефективності транспортних засобів. Обидві оцінки враховують фактичні енерговитрати транспорту на ділянках міських маршрутів. Адаптовано зазначений показник для визначення енергоефективності автобусів великого класу. Часткова оцінка механічної ефективності враховує технічні та експлуатаційні характеристики транспортного засобу, параметри пасажиропотоку на маршруті, градієнт дороги, погодні умови. Найбільш суттєвими є швидкість, прискорення та режими руху транспортного засобу. Розроблено аналітичні моделі оцінювання ефективності автобуса великого класу на окремому перегоні та послідовності перегонів заданого маршруту. В межах реалізації побудованих моделей розраховано значення корисної роботи на відрізках заданого перегону протягом фіксованого часового інтервалу. При цьому, зважена енергоефективність автобуса на досліджуваному маршруті дорівнює 0,20. Результати дослідження доцільно використовувати для контролю та прогнозування ефективності, а також визначення оптимальних режимів роботи міського пасажирського транспорту на маршрутах вулично-дорожньої мережі на мікро- та макрорівні в процесі транспортного планування великих міст. Запропоновано

методику також доречно застосовувати для порівняння та вибору транспортного засобу для здійснення раціонального перевезення пасажирів у межах міста. Подальші дослідження будуть спрямовані на налаштування комплексного показника енергоефективності на оцінювання інших категорій транспортних засобів та коригування відповідних вагових коефіцієнтів.

**КЛЮЧОВІ СЛОВА:** КРИТЕРІЙ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ, КОМПЛЕКСНИЙ ПОКАЗНИК ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ, МІСЬКИЙ ПАСАЖИРСЬКИЙ ТРАНСПОРТ, КОРИСНА РОБОТА.

#### **ABSTRACT**

Kostian N.L. Complex energy efficiency evaluation of urban passenger transport. Visnyk National Transport University. Series «Technical Sciences». Scientific journal. – Kyiv: National Transport University, 2022. – Issue 3 (53).

The scientific and technical problem of evaluating and improving the efficiency of urban passenger transport by the criterion of its environmental safety and energy consumption has been studied. A comprehensive energy efficiency indicator based on the use of weighted partial assessments of mechanical and energy efficiency of vehicles is proposed. Both estimates take into account the actual energy consumption of transport on urban routes. This indicator has been adapted to determine the energy efficiency of high-class buses. Partial assessment of mechanical efficiency takes into account the technical and operational characteristics of the vehicle, the parameters of passenger traffic on the route, the road gradient, weather conditions. The most important are the speed, acceleration and modes of movement of the vehicle. Analytical models for evaluating the efficiency of a high-class bus on a single haul and the sequence of hauls of a given route have been developed. Within the limits of realization of the constructed models the value of useful work on segments of the set haul during the fixed time interval is calculated. At the same time, the weighted energy efficiency of the bus on the studied route is equal to 0,20. The results of the study should be used to control and forecast efficiency, as well as to determine the optimal modes of urban passenger transport on the routes of the road network at the micro and macro levels in the process of transport planning of large cities. The proposed methodology is also appropriate to apply to the comparison and selection of a vehicle for the rational transportation of passengers within the city. Further research will focus on adjusting the integrated energy efficiency indicator to assess other categories of vehicles and adjust the relevant weights.

**KEY WORDS:** ENERGY EFFICIENCY CRITERIA, COMPLEX ENERGY EFFICIENCY INDICATOR, URBAN PASSENGER TRANSPORT, USEFUL WORK.

#### **АВТОР:**

Костьян Наталія Леонідівна, кандидат технічних наук, доцент, Черкаський державний технологічний університет, доцент кафедри автомобілів та технології їх експлуатації, e-mail: 438knl@gmail.com, тел. +380978480339, Україна, 18006, м. Черкаси, бул. Шевченка, 333, к.206, orcid.org/0000-0002-1599-4007.

#### **AUTHOR:**

Kostian Nataliia, Ph.D in Technical Science, Associate Professor, Cherkasy State Technological University, Associate Professor, Department of Automobiles and Technologies of their Operating, e-mail: 438knl@gmail.com, tel. +380978480339, Ukraine, 18006, Cherkasy, br Shevchenko, 333, of. 206, orcid.org/0000-0002-1599-4007.

#### **РЕЦЕНЗЕНТИ:**

Сахно В.П., доктор технічних наук, професор, Національний транспортний університет, завідувач кафедри автомобілів, Київ, Україна.

Тарандушка Л.А., доктор технічних наук, професор, Черкаський державний технологічний університет, завідувач кафедри автомобілів та технології їх експлуатації, Черкаси, Україна.

#### **REVIEWER:**

Sakhno V.P., Doctor of Technical Sciences, Professor, National Transport University, Head of the Department of Automobiles, Kyiv, Ukraine.

Tarandushka L.A., Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Cherkasy State Technological University, Head of the Department of Automobiles and Technologies of their Operating, Cherkasy, Ukraine.