

Аналіз і розроблення критеріїв експлуатаційної ефективності міських електробусів

Войтків С.В.¹

¹Науково-технічний центр «Автополіпром», Україна

Надійшла: 05.02.2024. Прийнято: 23.05.2024. Опубліковано: 11.06.2024. Відкритий доступ: CC BY 4.0.

Анотація. У статті проаналізовані основні – номінальна пасажировмістимість – й додаткові – споряджена і повна конструктивна маса, величина автономного пробігу, енергоємність автономних джерел електричної енергії – показники та існуючі критерії експлуатаційної ефективності міських електробусів, зокрема, питома витрата електроенергії. В ході дослідження було розроблено п'ять варіантів компоновальних схем міських низькопідлогових електробусів та розраховані їх основні технічні параметри. Результати аналітичних досліджень показали, що економічність експлуатації міських електробусів залежить від їх конструктивних особливостей за типом автономних джерел електричної енергії та систем їх заряджання або заміни. А існуючі й широко застосовувані критерії їх експлуатаційної ефективності не коректно відображають переваги тих чи інших типів міських електробусів в адекватних умовах експлуатації, оскільки не враховують їх основний технічний параметр – номінальну пасажировмістимість. Тому, у роботі запропоновано кілька критеріїв експлуатаційної ефективності міських електробусів різних типів з урахуванням їх вмістимості.

Ключові слова: міський електробус, автономне джерело електроенергії, критерії експлуатаційної ефективності, номінальна пасажировмістимість, енергоємність, автономний пробіг.

Вступ

Міські низькопідлогові електробуси, як один з видів рухомого складу міського електричного транспорту, завдяки екологічній безпечності у порівнянні з автобусами, обладнаними дизельними або газовими двигунами, уже доволі широко застосовуються у багатьох країнах світу. Бурхливий розвиток їх конструкцій протягом двох останніх десятиріч років призвів до появи різних типів електробусів за двома характерними ознаками:

- за типами автономних джерел електричної енергії (ДЕЕ), у якості яких застосовуються тягові акумуляторні батареї (АКБ), суперконденсатори (СК) або паливні елементи (ПЕ), які, у свою чергу, характеризуються різними підтипами;
- за системами їх заряджання або підзаряджання тягових АКБ або СК, заміни тягових АКБ або заправлення, зокрема, водневих паливних елементів (ПЕ).

На теперішній час створені наступні типи міських електробусів:

- ONC (Overnight Charging) – обладнані системою повільного заряджання тягових акумуляторних батарей (АКБ) у нічний час в умовах автобусних парків;
- ONC-C (C – classic) – обладнані тяговими АКБ відповідної ємності, необхідної для заданого денного автономного пробігу під час роботи на маршрутах;
- ONC-T (T – trailed) – обладнані тяговими АКБ, основна частина яких розміщена у причепі;
- ONC-V (V – variable) – обладнані системою заміни блоків тягових АКБ;
- OC (Opportunity Charging), обладнані системою ультрашвидкого підзаряджання ДЕЕ на зупинках:
- OC-B (Opportunity Charging – Battery), обладнані тяговими АКБ;
- OC-S (Opportunity Charging –

Supercapacitor), обладнані тяговими СК;

- IMC (In-Motion-Charging), обладнані системою підзаряджання автономних ДЕЕ під час руху по маршруту;

- FCEB (Fuel Cell Electric Buses) – обладнані ПЕ та системою заправлення;

- FCEB-H₂ (Fuel Cell Electric Buses) – обладнані водневими ПЕ та системою їх заправлення.

До цього переліку можна додати, принаймні, ще два типи свого роду гібридних міських електробусів, у тягових приводах яких використовуються два різних автономних ДЕЕ:

- ONC-(B+S) – обладнані тяговими АКБ і СК;

- ONC-B+H₂ – обладнані тяговими АКБ (основне ДЕЕ) і водневими ПЕ (додаткове ДЕЕ) в якості подовжувача автономного пробігу.

Тому, для вирішення, принаймні, одного із наступних двох завдань:

- вибору вітчизняними виробниками автобусного рухомого складу оптимального типу міського електробуса для проектування та організації дрібносерійного виробництва перспективних моделей;

- вибору комунальними підприємствами міського електротранспорту або підприємствами з міських перевезень пасажирів економічно доцільного типу електробуса для застосування на конкретних міських маршрутах за умови наявності відповідної інфраструктури, необхідні адекватні критерії їх експлуатаційної ефективності.

Аналіз публікацій

З недавніх років і, навіть, понині, компанії-виробники міських електробусів оперують таким показником їх переваг як величина автономного пробігу. Проте, великий автономний пробіг, сам по собі, аж ніяк не відображає ефективність експлуатації міських електробусів, оскільки чим більша його величина, тим менша номінальна пасажиромістимість при однаковій повній конструктивній масі.

Розгляду і аналізу експлуатаційної ефективності міських електробусів різних типів присвячено багато досліджень, у яких фахівці для її оцінки оперують різними критеріями. Їх, за відношенням до аналізованої системи, можна об'єднати у три основні гру-

пи, які пов'язані:

- з рухомим складом міського електротранспорту, у даному випадку з міськими низькопідлоговими електробусами;

- із локальною транспортною системою "міський електробус – необхідна інфраструктура";

- із загальною транспортною системою міського електротранспорту за наявності тролейбусної мережі.

Отже, ефективність експлуатації міських електробусів залежить від великої групи факторів, які характеризують, з одного боку, їх конструктивні особливості, а з іншого, особливості маршрутів, погодних умов, наявної інфраструктури тощо.

Одним із широко застосовуваних критеріїв оцінки економічності експлуатації міських електробусів являється питома витрата електроенергії.

Один з варіантів методики визначення реальної питомої витрати електроенергії при експлуатації міських електробусів та обґрунтування ємності тягової АКБ для забезпечення терміну її використання з заданою ймовірністю для роботи на маршруті відомої довжини запропонований у роботі [1]. У ній показано, що енергоємність тягових АКБ має бути достатньою для компенсації витрат електроенергії на рух за маршрутом та на живлення допоміжних систем (опалення, кондиціонування повітря тощо). Окрім того, вона повинна враховувати з ймовірністю 0,95 або 0,99 потрібну додаткову енергоємність тягових АКБ, яка забезпечить не перевищення в реальних експлуатаційних умовах гранично допустимого розряду, встановленого її виробником.

У дослідженні [2] наведено вичерпний огляд сучасного стану міського електробусного транспорту, пов'язаного із застосуванням для перевезень пасажирів електробусів, обладнаних тяговими АКБ, і представлено аналіз топології їх трансмісії й технології заряджання тягових АКБ з особливим акцентом на системах силової електроніки. На основі цього аналізу зроблено висновок, що фахівці міських комунальних підприємств громадського електротранспорту та інших фірм-перевізників повинні бути добре обізнані з інформацією щодо споживання електроенергії міськими електробусами різних типів у різних умовах експлуатації, зокрема, таких як особливості маршрутів, інтенсивність пасажиропотоків, погодні умови, цикли

водіння тощо. Ця інформація необхідна для визначення і вибору оптимальних типів міських електробусів для використання на конкретних маршрутах.

Оскільки питома витрата електроенергії міськими електробусами залежить від великої групи різних факторів, багато досліджень присвячені саме впливу тих чи інших чинників на середнє споживання енергії автономних ДЕЕ міськими електробусами різних типів.

Наприклад, у роботі [3] наведена модель прогнозування споживання енергії електробусами, оснащеними тяговими АКБ. В результаті проведених досліджень було встановлено, що підвищення ухилів міських вулиць на 1 % збільшує енергоспоживання (ЕС) на 0,380 кВт·год/км, кожне збільшення середньої швидкості на 10 км/год. збільшує показники ЕС на кВт·год/км. Аналогічно, кожне збільшення щільності зупинок на одну зупинку на 1 км маршруту збільшує ЕС на 0,128 кВт·год/км. Збільшення кількості пасажирів на 10 чол. збільшує споживану енергію на 0,05 кВт·год/км, а збільшення потужності системи опалення, вентиляції і кондиціонування (HVAC – Heating, Ventilation, & Air Conditioning) на 1 кВт призводить до збільшення ЕС на 0,036 кВт·год/км.

Автори досліджень [4-6] аналізували вплив параметрів міських маршрутів, величини енергоємності тягових АКБ і систем їх заряджання на споживання електроенергії. Ними встановлено, що середня величина ЕС міським електробусом з довжиною кузова біля 12,0 м та спорядженою масою 11636 кг, обладнаним тяговими АКБ енергоємністю 324 кВт·год і тривалістю заряджання не більше 2 год. від зарядного пристрою потужністю 90 кВт, становить 1,35 кВт·год/км. Така ємність тягових АКБ являється критично допустимою для електробусів типу ONC-C з умови забезпечення щоденного автономного пробігу у 242 км (150 миль). Зменшення енергоємності тягових АКБ, яке є особливо привабливим для зниження вартості електробусів, суттєво впливає на їх продуктивність. Зі зменшенням енергоємності тягових АКБ з 324 кВт·год до 150 кВт·год значно зростає тривалість їх активного заряджання під час перебування на маршрутах. Тому, втрачений час на перевезення пасажирів електробусами типу ОС-В становить майже 30 % від загальної тривалості роботи електробусів електробусами типу ONC-C. Отже, для компенсації втрати часу на

перевезення пасажирів необхідна додаткова кількість міських електробусів.

Дослідження енергетичних характеристик 22 міських електробусів протягом періоду моніторингу (липень 2018 – червень 2019) у процесі експлуатації на реальних маршрутах показало, що споживання електроенергії, окрім параметрів маршрутів, інтенсивності пасажиропотоків тощо залежить і від кліматичних параметрів – температури, вологості, атмосферного тиску і густини повітря [7]. Встановлено, що середньорічне ЕС міськими електробусами під час експлуатації у погодних умовах, характерних для переважної більшості міст континентальної Європи (середньорічні параметри – температура 11,7 °С, вологість повітря 75,3 %, атмосферний тиск 726,6 мм рт. ст.), становить 1,3716 кВт·год/км; середньорічна рекуперація енергії 0,4016 кВт·год/км. Енергоспоживання електробусів збільшується зі зниженням температури та атмосферного тиску, але така ж тенденція існує навіть при збільшенні вологості та густини повітря.

У роботі [8] досліджувався вплив маси автомобілів з електричним тяговим приводом та енергоємності їх тягових АКБ на ЕС. На основі проведених досліджень встановлено, що кожне збільшення маси транспортного засобу на 100 кг збільшує реальне споживання енергії тягових АКБ у залежності від його початкової маси на 0,4-1,3 кВт·год/100 км.

Деякі фахівці у різних країнах досліджували продуктивність та потребу в електроенергії міськими електробусами у процесі перевезень пасажирів і виявили, що середнє споживання електроенергії становить 1–2 кВт·год/км для моделей з довжиною кузовів біля 12,0 м [9] та 2–3,5 кВт·год/км для зчленованих електробусів з довжиною кузовів 18,0-18,7 м [10].

Експериментальні випробування міського електробуса з довжиною кузова 12,0 м та конструктивною масою 11300 кг за стандартизованим циклом SORT (Standardized On-Road Test) [11] показали, що середнє споживання електроенергії електробусом, необхідне тільки для забезпечення його руху становить 103 кВт·год/100 км, споживання електроенергії кондиціонером – біля 25 % (25 кВт·год/100 км), а використання енергії системою опалення сягає 150 %, тобто, 170 кВт·год/100 км при температурі навколишнього повітря від –10 до –15 °С.

Техніко-економічне порівняння різних концепцій міських електробусів на основі фактичного застосування у багатьох європейських містах наведено у роботі [12], а з умови вибору оптимальної системи та стратегії заряджання автономних ДЕЕ у дослідженнях [13-14].

Мета та постановка задачі

Мета дослідження полягає у формуванні критеріїв експлуатаційної ефективності міських низькопідлогових електробусів різних типів за автономними ДЕЕ та системами їх заряджання або заміни для проведення адекватної порівняльної оцінки і вибору найбільш оптимальних варіантів для застосування у системах міських перевезень пасажирів.

Для досягнення поставленої мети необхідно виконання наступних задач:

- формування найбільш характерних показників експлуатаційної ефективності міських електробусів;
- аналіз існуючих та формування нових критеріїв експлуатаційної ефективності міських електробусів;
- розроблення ескізних проектів міських низькопідлогових електробусів різних типів за автономними ДЕЕ та системами їх заряджання або заміни;
- визначення параметрів мас досліджуваних варіантів міських електробусів та номінальної пасажиромістимості;
- проведення порівняльного аналізу експлуатаційної ефективності досліджуваних типів міських електробусів із застосуванням пропонувананих критеріїв.

Характерні показники експлуатаційної ефективності міських електробусів

Відповідно до головного і, фактично, єдиного функціонального призначення міських електробусів – перевезення пасажирів, їх основним технічним параметром являється номінальна пасажиромістимість з урахуванням регламентованої мінімальної кількості пасажирських сидінь, встановлених у пасажирських салонах. Номінальна пасажиромістимість міських електробусів загалом залежить від двох параметрів:

- площі пасажирського салону, призначеної для розміщення пасажирських сидінь, пасажирів у інвалідних візках (не менше одного) на спеціальних місцях та пасажирів у

стоячому положенні;

- допустимої повної конструктивної маси, регламентованої нормативною документацією (ДСТУ, Правилами ЄЕК ООН тощо) або допустимими навантагами на керований, тяговий та тримальний мости.

Допустима повна конструктивна маса для двовісних електробусів та автобусів з гібридним тяговим приводом становить 19500 кг, яка на 1500 кг більша ніж для автобусів.

Іншим важливим експлуатаційним показником міських електробусів, особливо типу ONC-B, являється величина автономного пробігу, яка, у свою чергу, залежить від таких параметрів, як енергоємність автономних ДЕЕ та маси електробусів у спорядженому стані.

Окрім того, до групи додаткових показників, від яких залежить номінальна пасажиромістимість міських електробусів, входять маса у спорядженому стані, яка, у свою чергу, суттєво залежить від типу та енергоємності автономних ДЕЕ.

Критерії експлуатаційної ефективності міських електробусів

На основі аналізу публікацій, які стосуються дослідження технічних параметрів міських електробусів, можна виділити наступні критерії їх експлуатаційної ефективності:

- питому витрату електроенергії автономних ДЕЕ виключно на рух;
- питома споживання електроенергії автономних ДЕЕ системами опалення або кондиціонування повітря у пасажирському салоні;
- питому рекуперацію електроенергії.

Переважає більшість дослідників застосовує критерій питомої витрати або питомого споживання електроенергії по відношенню до пробігу електробуса, тобто, в одиницях кВт·год/100 км або у кВт·год/км:

$$\Delta w_l = \frac{W_{dee}}{L_{np}}, \quad (1)$$

де Δw_l – питома витрата електроенергії на одиницю пробігу, кВт·год/км; W_{dee} – витрата електроенергії електробусом під час руху, кВт·год; L_{np} – пробіг електробуса на витраченій електроенергії, км.

Проте, як показано у проведених дослідженнях [8] та [15] маса міських електробусів доволі суттєво впливає на питома споживання електроенергії (рис. 1).

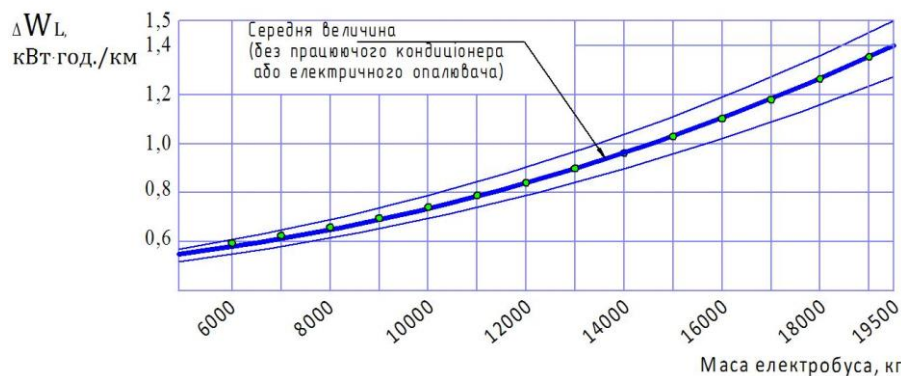


Рис. 1. Питома витрата електроенергії автономних ДЕЕ міськими електробусами у залежності від їх конструктивної маси при непрацюючій системі HVAC (тільки на рух)

Отже, оцінка електробусів за питомою витратою електроенергії їх автономних ДЕЕ на одиницю пробігу можлива лише за умови однакової повної конструктивної маси. Тому, деякі дослідники застосовують більш коректний критерій експлуатаційної ефективності міських електробусів, який враховує їх реальну конструктивну масу:

$$\Delta w_{lm} = \frac{W_{dee}}{L_{np} \cdot M_n}, \quad (2)$$

де Δw_{lm} – питома витрата енергії на одиницю пробігу і одиницю маси, кВт·год/км·кг; M_n – повна конструктивна маса електробуса, кг.

Проте, і цей критерій не можна вважати адекватним, адже він не враховує дуже важливий з огляду на економічність експлуатації міських електробусів основний і визначальний технічний параметр – номінальну пасажиромісткість.

Вираз витрати електроенергії автономних ДЕЕ міськими електробусами можна записати у двох варіантах. Перший враховує споживання електроенергії, необхідне для руху електробуса з повною або поточною конструктивною масою та для забезпечення роботи системи HVAC з урахуванням рекуперації електроенергії:

$$W_{dee} = W_{dee}^l + W_{dee}^s - W_{dee}^r, \quad (3)$$

де W_{dee} – витрата електроенергії міським електробусом при русі на маршруті, кВт·год; W_{dee}^l – витрата електроенергії, необхідна для забезпечення руху електробуса, кВт·год; W_{dee}^s – споживання електроенергії додатко-

вими системами (опалення, кондиціонування повітря тощо) під час перебування електробуса на маршруті, кВт·год; W_{dee}^r – поповнення енергії автономним ДЕЕ за рахунок рекуперації, кВт·год.

З цього виразу зрозуміло, що адекватне порівняння міських електробусів повинно враховувати не тільки пробіг та конструктивну масу з пасажиромісткістю, але й типи і потужність енергоспоживачів систем опалення і кондиціонування.

Інший вираз характеризує витрати електроенергії, необхідні для руху електробуса без пасажирів, тобто, з порожньою масою, та для перевезень пасажирів:

$$W_{dee} = W_{dee}^{M_{nop}} + W_{dee}^N, \quad (4)$$

де $W_{dee}^{M_{nop}}$ – витрата електроенергії електробусом під час руху з порожньою масою, кВт·год.; W_{dee}^N – додаткова витрата електроенергії електробусом, необхідна для перенесення пасажирів, кВт·год.

Як відомо, порожня маса електробуса становить:

$$M_{nop} = M_{cn} + m_{вод}, \quad (5)$$

де M_{cn} – маса електробуса у спорядженому стані, кг; $m_{вод}$ – маса водія, кг (для автобусів та електробусів, відповідно до вимог Правил ЄНК ООН № 107, $m_{вод} = 75$ кг).

Отже, при однаковій повній конструктивній масі електробуси різних типів, обладнані автономними ДЕЕ різної ємності, матимуть різну споряджену масу і, відповідно, різну

номінальну пасажировмістимість. Тому, для більш адекватної оцінки експлуатаційної ефективності міських електробусів різних типів близьких за конструкціями, необхідно застосовувати критерій, який враховує, окрім пробігу та конструктивної маси ще й їх вмістимість:

$$\Delta w_{lmN} = \frac{W_{dee}}{L_{np} \cdot M_n \cdot N_{nac}}, \quad (6)$$

де Δw_{lmN} – питома витрата електроенергії на одиницю пробігу і одиницю маси при перевезенні 1-го пасажирів, кВт·год/км·кг·чол.; N_{nac} – номінальна (розрахункова) пасажировмістимість електробуса, чол.

Для оцінки економічності експлуатації міських електробусів можна використовувати і питому витрату електроенергії автономних ДЕЕ для перевезення одного пасажирів на одиницю пробігу:

$$\Delta w_N = \frac{W_{dee}}{N_{nac}}, \quad (7)$$

де Δw_N – питома витрата електроенергії при перевезенні пасажирів, кВт·год/км·чол.

Відповідно до виразу (4) електроенергія автономних ДЕЕ міських електробусів необхідна для руху без пасажирів, тобто, з врахуванням тільки порожньої маси, та для виконання основного функціонального призначення – перевезення пасажирів.

Питому витрату електроенергії для руху електробуса без пасажирів на одному і тому ж маршруті можна вважати сталою величиною:

$$\Delta w_{M_{nop}} = \frac{W_{dee}^{M_{nop}}}{L_{np}} = const, \quad (8)$$

де $\Delta w_{M_{nop}}$ – питома витрата електроенергії при русі електробуса з порожньою масою, кВт·год/км.

Питома витрата електроенергії, необхідна для перевезення пасажирів, теж являється сталою величиною, яку, за результатами проведених досліджень [3], можна приймати рівною $\Delta w_{N_{nac}} = 0,005$ кВт·год/км·пас., а,

відповідно, до рис. 1, ця величина сягає значення $\Delta w_{N_{nac}} = 0,006$ кВт·год/км·пас.

Отже, для порівняння міських електробусів різних типів з різною номінальною вмістимістю питому витрату електроенергії при відсутності інформації виробників, доцільно визначати за виразом:

$$\Delta w_{lmN} = \frac{\Delta w_{M_{nop}}}{N_{nac}} + \Delta w_{N_{nac}}, \quad (9)$$

який враховує автономний пробіг, повну або проміжну конструктивну масу та кількість перевозимих пасажирів.

Розроблення ескізних проектів досліджуваних міських електробусів

Для проведення аналітичних досліджень з оцінки експлуатаційної ефективності міських електробусів за пропонуваними критеріями розроблені дві групи їх ескізних проектів на основі наступних вихідних умов:

- колісна формула електробусів усіх проектів – 4х2.2;
- довжина і ширина кузовів електробусів однакова, відповідно, 12,0 м і 2,55 м;
- добовий автономний пробіг електробусів типу ONC-C не менше 200 км;
- керований міст з незалежною підвіскою коліс моделі ZF RL 82 EC та тяговий міст інтегрально-портального типу із залежною підвіскою здвоєних коліс моделі ZF AVE 130 однаковий для всіх проектів електробусів;
- питома енергоємність тягових АКБ становить 10 кг/кВт·год;
- питома енергоємність тягових СК прийнята рівною 40 кг/кВт·год;
- інші комплектувальні вироби однакові для електробусів усіх проектів

Характерною особливістю електробусів першої групи типу ONC-C являється різна споряджена маса за рахунок виготовлення їх кузовів з різних матеріалів – нержавіючої сталі, алюмінієвих сплавів або композиційних матеріалів при однаковій агрегатній базі та однакових інших комплектувальних виробів, а також при однаковій енергоємності тягових АКБ. Параметри мас і вмістимості електробусів розроблених ескізних проектів, розрахованих за методикою [16], наведені у табл. 1.

Таблиця 1 – Основні технічні параметри проектів міських електробусів типу ONC-C

Позначка проекту електробуса	АПП-N1	АПП-N2	АПП-N3
Повна маса, кг	18000		
Енергоємність АКБ, кВт·год.	320		
Маса тягових АКБ, кг	3200		
Основні матеріали кузовів*	НС	АС	КМ
Споряджена маса без АКБ, кг	10960	9110	7260
Споряджена маса, кг	14160	12310	10460
Номінальна вмістимість, чол.	55	83	110
Примітки: *Позначення матеріалів: НС – нержавіюча сталь; АС – алюмінієві сплави; КМ – композиційні матеріали			

Проекти міських електробусів другої групи розроблені для порівняння економічності їх експлуатації в залежності від типу автономних ДЕЕ та систем їх заряджання за умови застосування однакових матеріалів для виготовлення кузовів. Їх розрахункові основні технічні параметри наведені у табл. 2.

Таблиця 2 – Основні технічні параметри проектів міських електробусів різних типів

Позначка проекту електробуса	АПП-N1	АПП-C1	АПП-S1
Тип	ONC-C	OC-B	OC-S
Повна маса, кг	18000		
Тип автономних ДЕЕ	АКБ		СК
Енергоємність АКБ, кВт·год	320	80	34

Таблиця 3 – Аналіз проектів міських електробусів різних типів за критеріями експлуатаційної ефективності

Позначка проекту електробуса	АПП-N1	АПП-N2	АПП-N3	АПП-C1	АПП-S1
Тип	ONC			OC-B	OC-S
Довжина кузова, м	12,0				
Повна конструктивна маса, кг	18000				
Номінальна вмістимість, чол.	55	83	110	91	82
Критерії експлуатаційної ефективності:					
Δw_l , кВт·год/км	1,264				
Δw_{lm} , кВт·год/км·кг	$0,702 \cdot 10^{-4}$				
Δw_{lmN} , кВт·год/км·кг·чол. (6)	$1,277 \cdot 10^{-6}$	$0,846 \cdot 10^{-6}$	$0,638 \cdot 10^{-6}$	$0,772 \cdot 10^{-6}$	$0,856 \cdot 10^{-6}$
Δw_N , кВт·год/км·чол. (7)	0,0230	0,0152	0,0115	0,0139	0,0154
Δw_{lmN} , кВт·год/км·чол. (9): при $\Delta w_{N_{nac}} = 0,005$ кВт·год/км·чол.	0,0228	0,0154	0,0119	0,0141	0,0155

Продовження табл. 2

Позначка проекту електробуса	АПП-N1	АПП-C1	АПП-S1
Маса ДЕЕ, кг	3200	800	1360
Основні матеріали кузовів*	НС		
Споряджена маса без ДЕЕ, кг	10960		
Споряджена маса, кг	14160	11760	12320
Номінальна вмістимість, чол.	55	91	82
Примітки: *Позначення матеріалів: НС – нержавіюча сталь			

Аналіз експлуатаційної ефективності досліджуваних міських електробусів за різними критеріями

Для порівнюваних проектів міських електробусів на основі рис. 1 визначена середня питома витрата електроенергії при повній конструктивній масі 18000 кг, яка становить $\Delta w_l = 1,264$ кВт·год/км. Отже, для всіх порівнюваних проектів електробусів однакова і величина $\Delta w_{lm} = 0,711 \cdot 10^{-4}$ кВт·год/км·кг. Тобто, усі розглянуті варіанти проектів міських електробусів з однаковою довжиною кузовів, рівною 12,0 м, і з однаковою конструктивною масою у 18000 кг за витратою електроенергії на одиницю пробігу та на одиницю пробігу і одиницю конструктивної маси рівноцінні.

Проте, їх номінальна пасажиромістимість за рахунок різної маси у спорядженому стані суттєво різняться, тому витрата електроенергії на перевезення одного пасажирів теж не однакова (табл. 3).

Аналіз отриманих результатів показує, що загальноприйнятий критерій оцінки міських електробусів навіть одного типу з однаковими розмірними параметрами по кузовах за питомою витратою електроенергії на одиницю пробігу являється не прийнятним. Наприклад, для порівнюваних проектів електробусів його величина однакова, але за рахунок різної спорядженої маси їх номінальна пасажиромістимість різниться від 20,9 % до 100 %.

На основі розрахунків за формулою (9) побудований графік залежності питомих витрат електроенергії, показаний на рис. 2.

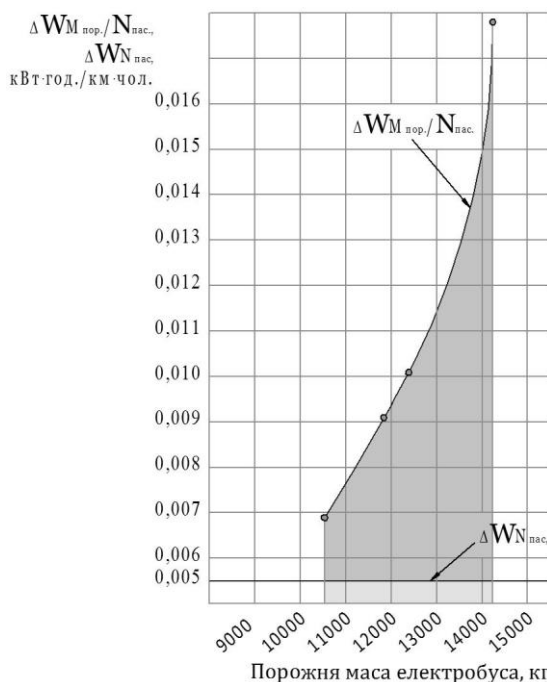


Рис. 2. Питомі витрати електроенергії автономних ДЕЕ міськими електробусами, розраховані за виразом (9)

Аналіз наведеного графіку показує, що питомі витрати електроенергії, необхідні для забезпечення руху електробусів, приведені до їх номінальної вмістимості, у 3,8-25,6 разів більші ніж на перевезення одного пасажирів. Отже, експлуатація електробусів з довжиною кузовів 12,0 м типу ONC-B за умови забезпечення величини автономного пробігу не менше 200 км, являється не ефективною через велику споряджену масу і малу пасажиромістимість. Тому, проектування перспективних моделей такого типу повинно проводити на основі оптимізації їх основних визначальних параметрів – довжини кузовів і номінальної вмістимості [17].

Порівняння експлуатаційної ефективності міських електробусів сучасних моделей, ідентичних за конструкцією але різних типів, наведено у табл. 4.

Таблиця 4 – Аналіз сучасних моделей міських електробусів різних типів за критеріями експлуатаційної ефективності

Модель електробуса	Danzer [18, 19]		Nesobus
	FC75	LR530	
Тип	OC-B	ONC-C	FCEB-H ₂
Довжина кузова, м	12,1		12,0
Повна конструктивна маса, кг	14795	-	19500
Номінальна вмістимість, чол.	90		93
Критерії ефективності:			
Δw_l , кВт·год/км	0,72	0,911	-
Δw_N , кВт·год/км·чол.	0,008	0,010	

Автономний пробіг сучасного польського електробуса моделі "Nesobus" [20] з довжиною кузова 12,0 м, обладнаного водневими паливними елементами сягає 450 км. При номінальній вмістимості 93 чол., всього на 3 чол. більший ніж у електробусів "Danzer", його повна конструктивна маса становить 19500 кг. Зрозуміло, що за майже однакової вмістимості економічність перевезень пасажирів вища у моделей електробусів з меншою повною конструктивною масою.

Висновки

На підставі проведених розрахунково-аналітичних досліджень можна зробити наступні висновки.

1. Для адекватної оцінки експлуатаційної ефективності не достатньо враховувати тільки їх тип, величину автономного пробігу та такий критерій, як питома витрата електроенергії автономного ДЕЕ на одиницю пробігу, тим паче, якщо невідомі випробувальні цикли, за методиками яких отримані величини цього критерію. Адже, питома витрата електроенергії електробусами, наприклад, "Danzer" однакової довжини (12,0 м) з однаковою вмістимістю 90 чол., але різних типів – OC-B (модель FC75) і ONC-C (модель LR530) становить, відповідно, 0,72 і 0,911 кВт·год/км, тобто, різниться на 26,5 %.

2. Для адекватного порівняння міських електробусів навіть одного і того ж типу запропоновані критерії експлуатаційної ефективності, які враховують їх основні технічні параметри – номінальну пасажировмістимість та споряджену або порожню масу:

- питома витрата електроенергії на одиницю пробігу і одиницю маси при перевезенні 1-го пасажирів, кВт·год/км·кг·чол;
- питома витрата електроенергії на одиницю пробігу при перевезенні 1-го пасажирів, кВт·год/км·чол.

3. При порівнянні міських електробусів однакової довжини (12,0 м) з однаковою повною конструктивною масою (18000 кг) різних типів з різною номінальною пасажировмістимістю (табл. 3) величини питомих витрат електроенергії на одиницю пробігу або на одиницю пробігу і одиницю маси однакові (відповідно, 1,264 кВт·год/км та $0,702 \cdot 10^{-4}$ кВт·год/км·кг), але їх номінальна вмістимість різниться до 2-х разів. Тому, величини питомих витрат електроенергії на одиницю пробігу або на одиницю пробігу і одиницю маси при перевезенні 1-го пасажирів цих електробусів відрізняються на 20,9-100 %.

4. Застосування розроблених критеріїв забезпечує адекватність порівняння експлуатаційної ефективності міських електробусів.

Конфлікт інтересів

Автор заявляє, що немає конфлікту інтересів щодо публікації цієї статті.

Література

1. Андрусенко, С. І., Будниченко В. Б., Подпіснєв В. С. (2022). Методика оцінки споживання енергії електробусом та параметрів тягової акумуляторної батареї в умовах експлуатації. *Автомобіль і електроніка. Сучасні технології: Електронне наукове спеціалізоване видання*, 22, 64–71. Andrusenko, S., Budnychenko, V., & Podpisnov, V. (2022). Metodyka otsinky spozhyvannia enerhii elektrobosom ta parametriv tiahovoi akumuliatornoj batarei v umovakh ekspluatatsii. [Methodology for estimating energy consumption for an electric bus and traction battery parameters in operating conditions.] *Vehicle and Electronics. Innovative Technologies*, (22), 64–71. <https://doi.org/10.30977/VEIT.2022.22.0.8>
2. Verbrugge, B., Hasan M. M., Rasool, H., Geury, T., El Baghdadi, M. & Hegazy, O. (2021). Smart Integration of Electric Buses in Cities: A Technological Review. *Sustainability*, 13, 12189. 1–23. <https://doi.org/10.3390/su132112189>
3. Abdelaty H. & Mohamed M. (2021). A Prediction Model for Battery Electric Bus Energy Consumption in Transit. *Energies*, 14, 2824. 1–26. <https://doi.org/10.3390/en14102824>
4. Gao, Z., Lin, Z., LaClair, T. J., Liu, C., Li, J.-M., Birky, A. K. & Ward, J. (2017). Battery capacity and recharging needs for electric buses in city transit service. *Energy*, 122, 588–600. <http://dx.doi.org/10.1016/j.energy.2017.01.101>
5. Basma, H., Mansour, C., Haddad, M., Nemer M. & Stabat, P. (2022). Energy consumption and battery sizing for different types of electric bus service. *Energy, Elsevier*, 239(PE). <https://doi.org/10.1016/j.energy.2021.122454>
6. Sadrani, M., Najafi, A., Mirqasemi, R. & Antoniou, C. (2023). Charging strategy selection for electric bus systems: A multi-criteria decision-making approach. *Applied Energy*, 347(1). <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2023.121415>
7. Iclodean, C., Cordos, N. & Todorut, A. (2019). Analysis of the Electric Bus Autonomy Depending on the Atmospheric Conditions. *Energies* 2019, 12, 4535. 1–23. <http://doi.org/10.3390/en12234535>.
8. Weiss, M., Cloos K. C. & Helmers, E. (2020). Energy efficiency trade-offs in small to large electric vehicles. *Weiss et al. Environ Sci Eur* 32:46. 1–17. <https://doi.org/10.1186/s12302-020-00307-8>
9. Gallet, M., Massier, T. & Hamacher, T. Estimation of the energy demand of electric buses based on real-world data for large-scale public transport networks. *Energy*, 230, 344–356. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2018.08.086>
10. Rogge, M., Wollny, S. & Sauer, D. U. (2015). Fast Charging Battery Buses for the Electrification of Urban Public Transport – A Feasibility Study Focusing on Charging Infrastructure and Energy Storage Requirements. *Energies*, 8(5), 4587–4606. <https://doi.org/10.3390/en8054587>
11. Gis, W., Kruczynski, S., Taubert, S. & Wierzejski, A. (2017). Studies of energy use by electric buses in SORT tests. *Engines*, 170(3), 135–138. <https://doi.org/10.19206/CE-2017-323>
12. Meishner, F. & Sauer, D. U. (2020). Technical and economic comparison of different electric bus concepts based on actual demonstrations in European cities. *IET Electrical Systems in Transportation*, 10(1), 144–163. <https://doi.org/10.1049/iet-est.2019.0014>
13. Basma, H., Haddad, M., Mansour, C., Nemer M. & Stabat, P. (2022).. Evaluation of the techno-economic performance of battery electric buses: Case study of a bus line in paris. *Research in Transportation Economics, Elsevier*, 95(C). <https://doi.org/10.1016/j.retrec.2022.101207>
14. Diaz Vasquez R. A., Flores, M. L. & Espinel E. L. (2024). A Multi-Criteria Decision Making TOPSIS Fusion Approach for Selection Best Strategy Charging for Electric Bus Systems. *Journal of Intelligent Systems and Internet of Things*, 11(01), 65–74. <https://doi.org/10.54216/JISIoT.110107>

15. Hodge, C., Jeffers, M., Desai, J., Miller, E. & Shah V. (2019). Surat Municipal Corporation Bus Electrification Assessment Golden, CO: National Renewable Energy Laboratory. Technical Report NREL/TP-5400-73600.
<https://www.nrel.gov/docs/fy19osti/73600.pdf>
16. Войтків С. В. (2022). Аналіз технічної досконалості міських електробусів різних типів. *Автомобіль і електроніка. Сучасні технології: Електронне наукове спеціалізоване видання*, 21. 64–78. Voytkiv S. V. (2022). Analiz tekhnichnoi doskonalosti miskykh elektrobusiv riznykh typiv. *Avtomobil i elektronika. [Analyzing technical perfection of city electric buses of various types.] Vehicle and Electronics. Innovative Technologies*, 21. 64–78. [in Ukrainian].
<https://doi.org/10.30977/VEIT.2022.21.0.03>.
17. Войтків С. В. (2021). Методика оптимізації основних технічних параметрів перспективних міських електробусів типу ОНС. *Автомобіль і електроніка. Сучасні технології: Електронне наукове спеціалізоване видання*. Харків : ХНАДУ, 20. 6–16. Voytkiv S. V. (2021). Metodyka optymizatsii osnovnykh tekhnichnykh parametriv perspektivnykh miskykh elektrobusiv typu ONS [The method of optimizing the main technical parameters of the promising city electric buses of ONS Type.] *Vehicle and Electronics. Innovative Technologies*, Kharkiv: KhNADU, 20, 6–16. [in Ukrainian].
<https://doi.org/10.30977/VEIT.2021.20.0.01>
18. Dancer. Dancer FC75 technical specification.
<https://dancerbus.com/FC75-EN.pdf>
19. Dancer. Dancer LR530 technical specification.
<https://dancerbus.com/FC75-EN.pdf>
20. Polish Hydrogen Bus. The future of municipal and metropolitan public transport – clean air for all of us. <https://www.nesobus.pl/en/>

Войтків Станіслав Володимирович¹, к.т.н., генеральний конструктор, Заслужений машинобудівник України,
тел. +38 067-447-04-90, voytkivsv@ukr.net,
ORCID: 0000-0002-7789-2081

¹Науково-технічний центр "Автополіпром", 79066, Україна, м. Львів, вул. Зубрівська, 32/24.

Analysis and development of criteria for the operational efficiency of urban electric buses

Abstract. Problem. Currently, manufacturers and research specialists primarily utilize the amount of autonomous mileage and/or the specific electricity consumption of autonomous DEEs per unit of mileage to describe the general characteristics of

urban electric buses. However, the structural mass and the key operational parameter, the nominal passenger capacity, are often disregarded. Therefore, comparing electric buses of the same type with identical dimensional parameters based solely on these criteria is illogical and incorrect. **Goal.** This study aims to establish criteria for the operational efficiency of urban low-floor electric buses of various types, considering autonomous DEE and their charging or replacement systems. These criteria should account for structural mass and nominal passenger capacity, facilitating a proper comparative assessment and the selection of the most optimal options for use in urban passenger transportation systems. **Methodology.** Criteria for the operational efficiency of city electric buses of various types are proposed based on an analysis of electricity consumption required for both movement and the operation of heating, ventilation, and air conditioning systems. The criteria consider the mass in the equipped state and the main parameter - nominal passenger capacity. **Results.** Several operational efficiency criteria for urban electric buses, incorporating mass parameters and passenger capacity, are suggested. The feasibility of their application is demonstrated through a comparison of five sketch projects of electric buses of various types with modern models. **Originality.** The proposed criteria for the operational efficiency of urban electric buses offer a method for adequately comparing any selected models, regardless of their types and technical specifications. **Practical value.** The proposed criteria for the operational efficiency of urban electric buses of various types can be beneficial for transport company specialists in selecting suitable rolling stock for specific routes. Additionally, design bureau and scientific and technical center specialists can utilize these criteria during the design process of new urban electric transport models.

Key words: city electric bus, autonomous source of electricity, operational efficiency criteria, nominal passenger capacity, energy consumption, autonomous mileage.

Stanislav Voytkiv¹, Cand. of Science, General Designer, voytkivsv@ukr.net, тел. +38 067-447-04-90, ORCID: 0000-0002-7789-2081

¹Scientific and technical Center "Autopoliprom", 32/24, Zubrivska, str., Lviv, 79066, Ukraine.