

УДК 629.341

DOI: 10.30977/VEIT.2023.23.0.2

Оцінка доцільності проектування, виробництва та експлуатації інноваційних міських електробусів середнього класу

Войтків С. В.¹

¹Науково-технічний центр «Автополіпром»

Анотація. У статті проведений аналіз основних технічних параметрів міських електробусів середнього класу, створених на основі застосування інноваційної компоувальної схеми, яка передбачає несиметричне розміщення незалежних підвісок лівого і правого коліс керованого моста та розміщення двох подвійних пасажирських дверей у середній частині їх кузовів у межах колісної бази. Розроблено три варіанти ескізних проектів перспективних міських електробусів типу ОНС з довжиною кузовів 8,0 м, 9,0 м та 10,0 м і дана оцінка доцільності їх проектування, освоєння дрібносерійного виробництва та подальшої експлуатації на міських маршрутах. Наведені рекомендації з вибору оптимальних типорозмірів міських електробусів середнього класу для застосування у системах міських перевезень пасажирів у залежності від інтенсивності пасажиропотоків.

Ключові слова: електробус I-го класу; міський електробус типу ОНС; електробус середнього класу; пасажиромістимість електробуса; параметри мас електробуса; автономний пробіг.

Вступ

На нинішній час для перевезень пасажирів на міських маршрутах застосовуються, здебільшого, електробуси великого класу (ВКл) за довжиною кузовів, яка становить понад 10,0 м до 12,0 м включно. Хоча, більшість сучасних моделей міських електробусів мають довжину кузовів у діапазоні 11,9...12,4 м, хоча моделі з кузовами довжиною понад 12,0 м формально відносяться уже до електробусів особливо великого класу (ОВКл), гранична довжина яких для одинарних електробусів складає понад 12,0 м до 15,0 м.

За типом системи заряджання автономних джерел електричної енергії (ДЕЕ) найбільшого застосування на нинішній час набули міські електробуси двох типів:

- ОНС (Overnight Charging) – обладнані системою повільного заряджання тягових акумуляторних батарей (АКБ) у нічний час;
- ОС (Opportunity Charging), обладнані системою ультрашвидкого підзаряджання автономних ДЕЕ на зупинках.

Кожному з цих типів електробусів властиві відповідні переваги та недоліки. Електробуси типу ОНС характеризуються меншою пасажиромістимістю, а електробуси типу ОС,

хоча й мають більшу вмістимість при однаковій повній конструктивній масі, зате потребують наявності зарядних станцій на кількох зупинках – кінцевих або проміжних.

Оскільки переважаюча більшість моделей сучасних міських електробусів належить до типу ОНС, саме він обраний для проведення досліджень стосовно оцінки доцільності їх проектування, освоєння виробництва вітчизняними підприємствами та подальшої експлуатації на міських маршрутах. Окрім того, вибір електробусів типу ОНС обумовлений також і активними проектними роботами у напрямку створення електробусів підтипу ОНС-V (V – variable), обладнаних системою заміни блоків тягових акумуляторних батарей (АКБ).

Аналіз публікацій

Основними, тобто, найбільш визначальними конструктивними, експлуатаційними та економічними параметрами міських електробусів будь-якого типу являються:

- номінальна пасажиромістимість з умови застосування максимальної допустимої питомої норми стоячих пасажирів, оскільки перевезення пасажирів являється їх головною функцією;

- величина автономного пробігу без додаткового заряджання/ підзаряджання автономних ДЕЕ;
- питома витрата електроенергії для перевезення одного пасажирів;
- собівартість перевезень пасажирів на маршрутах;
- ринкова вартість придбання електробуса, яка у значній мірі пов'язана із вартістю автономних ДЕЕ та їх життєвим циклом.

Перспективність напрямку розвитку міських електробусів типу ОНС обґрунтована проведеними у багатьох різних європейських містах результатами досліджень [1], побудованих на порівнянні основних технічних параметрів і економічних показників електробусів різних концепцій, обладнаних системами нічного, помірного й дуже швидкого заряджання тягових АКБ, а також їх підзаряджання від існуючих троллейбусних мереж. Проведені дослідження показали, що концепція ОНС являється найбільш доцільною для створення нових перспективних моделей міських електробусів, оскільки обсяги необхідних інвестицій в існуючі міські інфраструктури суттєво менші. Щоправда, відмічені й деякі недоліки таких електробусів – велика маса тягових АКБ і, відповідно, менша номінальна пасажиромістимість, а також необхідність застосування автономного опалювача, який працює на дизельному пальному, для збільшення величини автономного пробігу у холодний період року.

Застосування міських електробусів типу ОНС пропагується як найбільш прийнятна альтернатива для заміни автобусів з дизельними двигунами і у роботі [2]. Її авторами на підставі проведених порівняльних досліджень різних типів міських електробусів паралельним порівнянням їх основних характеристик зазначено, що застосування міських електробусів типу ОНС буде все більше посилюватись. Особливо, з врахуванням очікуваного вдосконалення конструкцій та технологій виготовлення тягових АКБ, а також тенденцій до використання відновлювальних джерел у виробництві електроенергії.

Як відомо, у системах тягових приводів міських електробусів типу ОНС у якості автономних ДЕЕ застосовуються тягові АКБ різних типів. Економічна доцільність їх використання для живлення тягових електродвигунів таких електробусів обґрунтована у дослідженні [3] на основі експериментальних пара-

метрів реальної експлуатації міських електробусів на конкретній маршрутній мережі. Аналіз енергоємності тягових АКБ електробусів типу ОНС та потужності зарядних станцій, необхідних для їх повільного заряджання у нічний час доби, показав, що зарядні станції середньої потужності в поєднанні з тяговими АКБ середньої енергоємності перевершують системи їх заряджання з низьким енергоспоживанням та системи ультрашвидкого заряджання на основі потужних зарядних станцій.

Однією з важливих проблем експлуатації міських електробусів типу ОНС являється проблема, пов'язана з майже одночасним заряджанням тягових АКБ великої кількості електробусів. Основні аспекти цієї проблеми детально розглянуті у роботі [4], адже одночасне заряджання тягових АКБ великої сумарної енергоємності може призвести до необхідності застосування електричних підстанцій надзвичайно високої потужності. У цьому дослідженні обґрунтована також необхідність розподілення процесу заряджання тягових АКБ великої кількості електробусів типу ОНС на кілька періодів з урахуванням технічних, економічних та експлуатаційних параметрів мережі зарядних станцій. Автори роботи спрогнозували, що, у майбутньому, все більша кількість міських електробусів буде відноситися до типу ОНС.

Необхідність врахування можливостей інфраструктури електричних підстанцій при виборі типів електробусів обґрунтована і у роботі [5]. На основі аналізу різних систем заряджання їх тягових АКБ показано, що, наразі, найбільш доцільними для перевезень пасажирів на міських маршрутах являються два підтипи електробусів – ОНС-В (В – battery) та ОС-Всз з пантографом, розміщеним на зарядній станції (*charging station*). Електробуси підтипу ОС-Всз мають ряд суттєвих переваг порівняно з електробусами підтипу ОС-Вrb (*roof of the bus*), у яких пантограф розміщений на даху кузова. А відносним недоліком електробусів підтипу ОНС-В, тобто, електробусів, які обладнані тяговими АКБ такої енергоємності, яка необхідна для роботи на маршруті протягом усього відведеного часу, являється необхідність ручного підключення рознімного штекера до зарядної станції.

Як показано у роботі [6], визначення енергоємності автономних накопичувачів електроенергії та необхідної інфраструктури для їх заряджання, являється ключовим етапом про-

ектування перспективних конкурентоспроможних міських електробусів. Для забезпечення конкурентоспроможності міські електробуси типу ONC поряд з високими конструктивними і експлуатаційними параметрами повинні характеризуватися меншою величиною ТСО порівняно з міськими автобусами, обладнаними дизельними двигунами. Проте, для забезпечення належного або заданого автономного пробігу таких електробусів необхідні тягові АКБ великої енергоємності, придбання яких пов'язано з високими інвестиційними витратами. Окрім того, доволі складною проблемою являється оптимізація процесу заряджання тягових АКБ великої кількості електробусів типу ONC у нічний час доби.

Проблемам, пов'язаним з оптимізацією зарядної інфраструктури з метою зменшення обсягів фінансування на її облаштування та експлуатаційних витрат міських електробусів, присвячено дослідження [7, 8].

Питання вибору довжини кузовів міських електробусів з огляду на витрату електроенергії та ряд інших параметрів розглянуті у роботі [9]. На основі експериментальних досліджень електробусів різних виробників з довжиною кузовів 8,05-8,5 м (чотири моделі) та 10,48-10,5 м (п'ять моделей) на чотирьох різних міських маршрутах при різних погодних умовах встановлена залежність витрати електроенергії тягових АКБ від маси електробусів, параметрів маршрутів та температур повітря навколишнього середовища.

Результати аналогічних досліджень з визначення витрати електроенергії міськими електробусами різних типорозмірів за довжиною кузовів наведені і у роботах [10, 11].

Мета та постановка задачі

Метою роботи являється оцінка доцільності проектування, освоєння виробництва на підприємствах України та подальшого застосування перспективних конкурентоспроможних інноваційних міських електробусів СКл з довжиною кузовів у діапазоні понад 8,0 м до 10,0 м для перевезень пасажирів на міських маршрутах.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішення наступних завдань:

- розроблення ескізних проектів інноваційних електробусів СКл типу ONC різних типорозмірів на основі дотримання принципу "при інших однакових умовах";
- формування найбільш характерних по-

казників для порівняльного аналізу електробусів СКл різної номінальної пасажировмістимості;

- проведення порівняльного аналізу найбільш визначальних параметрів міських електробусів одного типу різної номінальної вмістимості;
- оцінка доцільності створення інноваційних міських електробусів СКл;
- вибір довжини кузовів інноваційних міських електробусів СКл для подальшого проектування та організації виробництва на вітчизняних підприємствах.

Концепція розроблення ескізних проектів міських електробусів

Для проведення досліджень міських електробусів СКл типу ONC з системою повільного заряджання тягових АКБ у нічний час доби прийнята концепція створення їх ескізних проектів на основі застосування інноваційної компоновальної схеми на наступних засадах:

- колісна формула – 4x2.1 на основі застосування тягових мостів розрізного типу з незалежною підвіскою одинарних коліс;
- формула службових (пасажирських) дверей – 0-2+2-0, яка передбачає застосування двох подвійних пасажирських дверей, розміщених у середніх частинах кузовів електробусів у межах їх колісних баз;
- застосування повністю відокремленого від пасажирського салону відділення водія з входом із салону;
- обов'язкова наявність не менше одного накопичувального майданчика для розміщення пасажирів у інвалідному візку;
- планування пасажирських салонів – змішане, у середній частині пасажирських салонів – дво- або трирядне;
- допустиме встановлення пасажирських сидінь – за напрямком руху або спинками до боковин (переважне), мінімальна кількість – проти напрямку руху;
- мінімізація переднього і заднього звисів кузовів електробусів завдяки застосуванню тягового моста з незалежною підвіскою коліс;
- розрахункова довжина типорозмірів кузовів електробусів трьох моделей – 8,0 м, 9,0 м та 10,0 м;
- ширина кузовів електробусів однакова для усіх типорозмірів – 2,55 м;
- розміщення тягових АКБ – у техніч-

ному відсіку у задній частині та на дахах кузовів електробусів;

- розрахункова величина автономного руху – не менше 200 км;
- допустима повна маса електробусів – на рівні допустимої повної маси двомостових автобусів та вантажних автомобілів, тобто не більше 18000 кг;
- конструкція кузовів електробусів – модульного типу, які складаються із відповідної кількості максимально уніфікованих модулів.

Ескізні проекти електробусів середнього класу типу ОНС

Базовим кузовом інноваційних міських електробусів заданих типорозмірів являється кузов найменшої довжини, тобто 8,0 м. Оскільки для забезпечення зручного входу-виходу з пасажирського салону передбачено двоє подвійних пасажирських дверей електробус такої довжини повинен мати достатню велику колісну базу. Зрозуміло, що забезпечення великої колісної бази у електробусах з довжиною кузова 8,0 м можливе лише за рахунок мінімізації переднього і заднього звисів.

Проте, мінімізація переднього звису за умови застосування керованих мостів будь-якого типу потребує

або розміщення сидіння водія на ділянці підлоги, висота якої, для доступу до робочого місця водія, вимагає облаштування, щонайменше, двох проміжних сходинок;

або зміщення робочого місця водія до поздовжньої осі симетрії кузова електробуса, тобто встановлення сидіння водія між арками коліс керованого моста.

Обидва варіанти мають ряд недоліків, зокрема, зміщене розміщення сидіння водія утруднює передній огляд під час об'їзду чи обгону інших транспортних засобів, які рухаються попереду. Тому, автором запропонований інший варіант мінімізації переднього звису міських

електробусів з кузовами малої довжини. Він полягає у застосуванні керованого моста з незалежною підвіскою коліс, розміщених асиметрично відносно поздовжньої осі симетрії кузова електробуса (рис. 1).

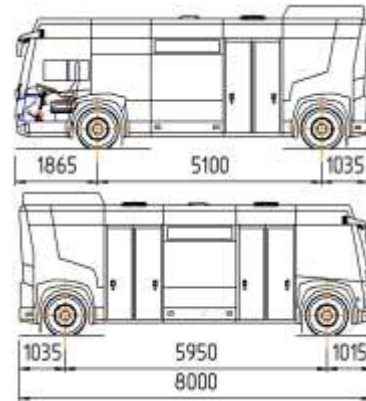


Рис. 1. Міський електробус з асиметричним розміщенням коліс керованого моста

У такому варіанті керованого моста передній звис кузова з боку правого колеса мінімізований (1,015 м), що забезпечує велику зону у середній частині кузова для розміщення двох подвійних пасажирських дверей. З боку лівого колеса звис збільшений до 1,865 м, тобто до такої величини, яка забезпечує зручне розміщення сидіння водія з доступом до нього без проміжних сходинок. Звісно, колісні бази таких електробусів одного і того ж типорозміру мають різні величини – більшу по правій боковині і меншу на 0,85 м для всіх трьох типорозмірів – по лівій боковині. Відносними недоліками пропонованого рішення являються деяке ускладнення кермового управління та вхід до відділення водія з пасажирського салону.

Бокові проекції та планування пасажирських салонів розроблених ескізних проектів міських електробусів трьох типорозмірів за довжиною кузовів наведені на рис. 2.

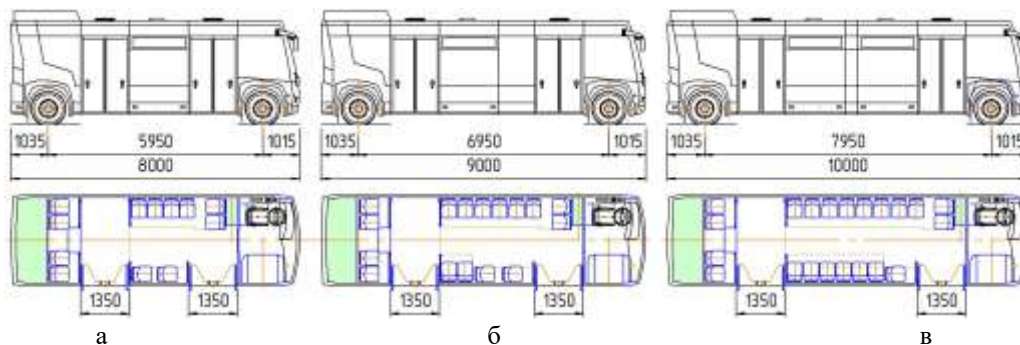


Рис. 2. Планування пасажирських салонів міських електробусів СКл: а) – проект АПП-С01; б) – проект АПП-С02; в) – проект АПП-С03

Вхід до повністю ізолюваного відділення водія з метою забезпечення комфортабельних умов праці, здійснюється через двері безпосередньо з пасажирського салону.

Основні блоки тягових АКБ та інші комплектувальні вироби системи керування тяговим приводом електробусів розміщуються у задній частині та на даху їх кузовів.

З огляду на оптимізацію планувань пасажирських салонів з метою досягнення найбільшої пасажировмістимості застосоване їх двохрядне планування з розміщенням одинарних пасажирських сидінь у середній частині спинками до обох боковин. І лише за відділенням водія навпроти передніх пасажирських дверей два сидіння встановлені спинками у напрямку руху електробусів.

Накопичувальні майданчики у салонах електробусів кожного проекту облаштовані навпроти задніх пасажирських дверей з огляду на оптимізацію навантаг на колеса керованого і тягового мостів.

Визначення параметрів пасажировмістимості електробусів СКл розроблених проектів

До параметрів пасажировмістимості міських електробусів відносяться номінальна вмістимість, кількість пасажирських сидінь, встановлених у пасажирських салонах, кількість пасажирів, які перевозяться у інвалідних візках, та кількість пасажирів, які можуть перевозитись у стоячому положенні.

Номінальна пасажировмістимість електробусів обмежується двома параметрами:

площею пасажирського салону, призначеною для розміщення пасажирських сидінь та стоячих пасажирів;

допустимою масою пасажирів за умови прийнятого значення допустимої повної маси електробусів.

Номінальна пасажировмістимість за допустимою масою пасажирів визначається за виразом:

$$N_{\text{пас}}^m \leq \frac{[M_{\text{п}}] - (M_{\text{сп}}^e + m_{\text{вод}})}{m_{\text{пас}}}, \quad (1)$$

де $[M_{\text{п}}]$ – допустима повна маса електробуса, кг; $M_{\text{сп}}^e$ – маса спорядженого електробуса, кг; $m_{\text{вод}}$ – розрахункова маса водія, кг; $m_{\text{пас}}$ – розрахункова маса пасажирів, кг.

Прийнятою концепцією передбачена допустима повна маса проєктованих електробусів $[M_{\text{п}}] = 18000$ кг, хоча для електробусів та автобусів, обладнаних гібридними тяговими приводами, допускається збільшення її величини на 1500 кг, тобто до рівня $[M_{\text{п}}^e] = 19500$ кг.

Для міських електробусів, відповідно до вимог Правил ЕЭК ООН № 107, маса водія становить $m_{\text{вод}} = 75$ кг; маса 1-го пасажирів приймається рівною $m_{\text{пас}} = 68$ кг.

Номінальна пасажировмістимість міських електробусів за площею пасажирського салону, призначеною для розміщення пасажирських сидінь та стоячих пасажирів, становить:

$$N_{\text{пас}}^s \leq n_{\text{сид}} + \frac{S_{\text{ст}}}{q_{\text{пас}}}, \quad (2)$$

де $n_{\text{сид}}$ – кількість одинарних пасажирських сидінь, встановлених у пасажирському салоні, од.; $S_{\text{ст}}$ – площа підлоги пасажирського салону, на якій можуть розміщатися пасажирів у стоячому положенні, м²; $q_{\text{пас}}$ – питома площа для розміщення 1-го стоячого пасажирів.

Для міських електробусів приймається $q_{\text{і ап}} = 0,125$ м²/пас., що становить 8 пас./м² (максимальна величина).

Мінімальна кількість одинарних пасажирських сидінь, які повинні бути встановлені у пасажирському салоні міських електробусів, становить, відповідно до вимог Правил ЕЭК ООН № 107:

$$0,9S_{\text{пс}} \leq n_{\text{сид}}^{\text{мін}} \leq S_{\text{пс}}, \quad (3)$$

де $S_{\text{пс}}$ – площа пасажирського салону для розміщення пасажирських сидінь та стоячих пасажирів, м².

Максимально можлива кількість одинарних пасажирських сидінь обумовлюється площею пасажирського салону, призначеною для розміщення пасажирських сидінь та стоячих пасажирів; можливими варіантами планувань пасажирського салону.

Розрахункові параметри пасажировмістимості розроблених проектів перспективних

інноваційних міських електробусів за площами їх пасажирських салонів наведені у таблиці 1.

Таблиця 1. Параметри пасажировмістимості проектів міських електробусів СКл за площею пасажирського салону

Проект електро-буса	АПП-С01	АПП-С02	АПП-С03
Площа пасажирського салону, $S_{пс}$, м ²	12,7	15,1	17,5
Площа салону для розміщення стоячих пасажирів, $S_{ст}$, м ²	6,5	7,3	7,8
Кількість одинарних пасажирських сидінь, мінімальна, $n_{сид}^{min}$, од.	12-13	14-15	16-18
Параметри пасажировмістимості, чол.:			
- сидячих, $n_{сид}$	12	16	21
- стоячих, $n_{ст}$	52	58	62
- номінальна за площею салону, $N_{пас}^s$	64	74	83

$$M_{сп}^e = M_{сп}^k + (m_{км+n} + m_{мм+np} + \sum m_k + m_{мед}) + \sum m_{ин} + (m_{ск} + m_{акб}) + \sum m_{суд}, \quad (5)$$

де $M_{сп}^k$ – маса спорядженого кузова електробуса (без маси тягових АКБ, агрегатів трансмісії та ходової частини, без маси пасажирських сидінь тощо), кг; $m_{км+n}$ – маса керованого моста з підвіскою коліс, кг; $m_{мм+np}$ – маса тягового моста з підвіскою коліс і редуктором головної передачі, кг; $\sum m_k$ – маса коліс керованого і тягового мостів (маса колісних дисків і шин), кг; $m_{мед}$ – маса тягового електричного двигуна (ЕД), кг; $\sum m_{ин}$ – маса комплектувальних виробів системи кермового керування, гальмівних систем, системи низьковольтного електрообладнання, системи автономного опалення, системи кондиціонування повітря у пасажирському салоні тощо), кг; $m_{ск}$ – маса системи керування електричним тяговим приводом, кг; $m_{акб}$ – маса блоків тягових АКБ, кг; $\sum m_{пс}$ – маса встановлених у пасажирському салоні одинарних сидінь, кг.

Маса спорядженого кузова електробуса без маси тягових АКБ, агрегатів трансмісії та

Як видно з отриманих результатів, зі збільшенням довжини кузовів електробусів їх вмістимість зростає на 9-10 чол./м.

Визначення параметрів мас електробусів СКл типу ОНС різних типорозмірів

До основних параметрів мас електробусів належать допустима повна маса, маса у спорядженому стані, порожня маса і допустима маса пасажирів, а також маса блоків тягових АКБ через значний вплив на величину їх номінальної пасажировмістимості.

Повна конструктивна маса електробусів складається з трьох параметрів:

$$M_{п}^e = M_{сп}^e + m_{вод} + M_{пас} \leq [M_{п}], \quad (4)$$

де $M_{сп}$ – маса спорядженого електробуса, кг; $M_{пас}$ – маса пасажирів, кг.

З огляду на різні типорозміри проектованих електробусів вираз для визначення маси електробусів у спорядженому стані, за умови застосування керованого і тягового мостів з незалежною підвіскою коліс, можна записати у наступному вигляді:

ходової частини, без маси пасажирських сидінь та інших комплектувальних виробів визначається за виразом, аналогічним наведеному в [12]:

$$M_{сп}^k = \Delta m_{сп}^k L_{куз}, \quad (6)$$

де $\Delta m_{сп}^k$ – питома маса кузова споряджених електробусів-аналогів без маси тягових АКБ, агрегатів трансмісії та ходової частини, кг/м; $L_{куз}$ – довжина кузова проектованого електробуса, м.

Для проведення розрахункових досліджень питома маса кузовів споряджених міських електробусів прийнята рівною $\Delta m_{сп}^k = 680$ кг/м (діапазон величин для міських автобусів $\Delta m_{сп}^k = 650-700$ кг/м).

Для розроблення ескізних проектів міських електробусів СКл вибрані керований та тяговий мости з незалежною підвіскою одинарних коліс виробництва італійсько-турецької

компанії "Brist Axle S.r.l." моделей:

- IFS TJC 80-225 – керований міст з підвіскою коліс;
- IDS TJ 105-225 HR – тяговий міст з підвіскою коліс і редуктором головної передачі (ГП).

Колеса керованого і тягового мостів обладнані шинами типорозмірів, відповідно, 275/70 R22.5 або 315/70 R22.5 та 385/55 R22.5.

Маси керованого і тягового мостів, маси коліс і допустимі навантаги на мости у залежності від типорозмірів шин та допустима повна маса електробусів наведені у таблиці 2.

Таблиця 2. Параметри мас і допустимих навантаж на мости міських електробусів СКЛ

Модель моста	IFS TJC 80-225		IDS TJ 105-225 HR
Призначення	керований		тяговий
Допустима навантага, кН (кГс)	63,74 (6500)	78,48 (8000)	103,00 (10500)
Маса моста, кг	460		580
Типорозмір шин	275/70	315/70	385/55
Маса коліс, кг	184	212	234
Маса моста з колесами, кг	644	672	814

Для тягового приводу електробусів вибраний тяговий ЕД моделі "TM4 SUMO MD HV2500-6P" виробництва канадської фірми "Dana TM4 Inc." номінальною потужністю 115 кВт, маса якого 225 кг.

Для проведення розрахункових досліджень прийняті наступні величини параметрів мас, які входять до (5), $m_{ск} = 300$ кг; $\sum m_{ин} = 1000$ кг.

Маса пасажирських сидінь визначається за кількістю, встановленою у пасажирських салонах:

$$\sum m_{сид} = n_{oc} m_{oc}, \quad (7)$$

де n_{oc} – кількість одинарних сидінь, встановлених у пасажирському салоні, од.; m_{oc} – маса одинарного пасажирського сидіння, кг.

Маса одинарного пасажирського сидіння прийнята рівною $m_{oc} = 15$ кг.

Маса блоків тягових АКБ відповідного типу визначається за формулою:

$$m_{акб} = \frac{W_{акб}}{\rho_{акб}^w}, \quad (8)$$

де $W_{акб}$ – енергоємність тягових АКБ, необхідна для забезпечення величини заданого автономного пробігу, кВт·год.; $\rho_{акб}^w$ – питома енергоємність тягових АКБ, кВт·год./кг.

Необхідна енергоємність блоків тягових АКБ розраховується за виразом:

$$W_{акб} = \frac{\Delta w_m [M_{п}]}{k_p} \sum_{i=1}^n L_{M_i}, \quad (9)$$

де Δw_m – питома витрата енергоємності тягових АКБ з урахуванням маси електробуса та величини автономного пробігу, кВт·год./кг·км; k_p – коефіцієнт допустимого

розрядження тягових АКБ; $\sum_{i=1}^n L_{i_i}$ – величина

автономного пробігу електробуса під час роботи на маршруті, км.

Добова величина автономного пробігу електробусів усіх типорозмірів прийнята рівною $\sum_{i=1}^n L_{M_i} = 200$ км.

Середня витрата енергоємності тягових АКБ міськими електробусами становить $\Delta w_m = (0,07-0,08) \cdot 10^{-3}$ кВт·год./кг·км.

Для сучасних літєвих тягових АКБ типу LiFePO₄ $\rho_{акб}^w = 0,09-0,10$ кВт·год./кг, а коефіцієнт робочого діапазону $k_p = 0,85-0,9$.

Для проведення розрахунків прийняті величини $k_p = 0,85$; $\rho_{акб}^w = 0,10$ кВт·год./кг та $\Delta w_m = 0,075 \cdot 10^{-3}$ кВт·год./кг·км.

Оскільки повна конструктивна маса електробусів різних типорозмірів теж буде різною допустиму повну масу $[M_{п}]$ можна замінити наступним виразом:

$$[M_{п}] = M_{сп}^o + m_{вод} + m_{пас} N_{пас}^s + m_{акб}, \quad (10)$$

де $M_{сп}^o$ – маса спорядженого електробуса без урахування маси тягових АКБ, кг.

Тоді, на основі виразів (8)-(10) отримуємо формулу для визначення маси блоків тягових АКБ необхідної енергоємності:

$$m_{акб} = \frac{\Delta w_m \sum_{i=1}^n L_{M_i} (M_{сп}^o + m_{вод} + m_{пас} N_{пас}^s)}{k_p \rho_{акб}^w - \Delta w_m \sum_{i=1}^n L_{M_i}}. \quad (11)$$

Розрахункові величини мас споряджених проєктованих електробусів СКл без урахування маси блоків тягових АКБ наведені у таблиці 3.

Таблиця 3. Розрахункові маси споряджених електробусів різних типорозмірів без урахування маси тягових АКБ

Проект електробуса	АПП-С01	АПП-С02	АПП-С03
Довжина кузова, $L_{куз}$, м	8,0	9,0	10,0
Параметри мас, кг:			
- маса кузова, $M_{сп}^к$	5440	6120	6800
- маса мостів, $m_{км+n} / m_{мм+np}$	460		580
- маса коліс, $\sum m_k$	184	212	234
- маса ЕД, $m_{мед}$	225		
маса інших складових частин, $\sum m_{in}$	1000		
- маса системи, $m_{ск}$	300		
- споряджена маса без маси АКБ, $M_{сп}^о$	7609	8317	9140

Розрахункові параметри тягових АКБ міських електробусів різних типорозмірів наведені у таблиці 4.

Таблиця 4. Основні параметри тягових АКБ у залежності від підтипів електробусів

Проект електробуса	АПП-С01	АПП-С02	АПП-С03
Енергоємність, $W_{акб}$, кВт·год	256	284	317
Маса тягових АКБ, $m_{акб}$, кг	2560	2840	3170

Розрахункові величини споряджених і порожніх (споряджена маса електробуса з масою водія) мас електробусів СКл типу ОНС та повні конструктивні маси наведені у таблиці 5.

Аналіз розрахованих повних конструктивних мас показує, що хоча електробус типорозміру АПП-С03 за повною конструктивною масою перевищує на 30 кг прийнятну величину

$[M_n] = 18000$ кг, його розрахункова номінальна пасажиромістимість за допустимою повною масою, визначена за виразом (1), становить тих же 83 чол.

Таблиця 5. Розрахункові параметри мас міських електробусів СКл типу ОНС

Проект електробуса	АПП-С01	АПП-С02	АПП-С03
Параметри мас, кг:			
- споряджена	10170	11160	12310
- порожня	10245	11235	12385
- повна конструктивна	14600	16200	18030

Оцінка доцільності експлуатації міських електробусів СКл

Оцінка доцільності створення виробництва та застосування міських електробусів СКл типу ОНС для перевезень пасажирів ґрунтується на порівняльному аналізі пропонувананих типорозмірів і сучасних моделей міських електробусів середнього і великого класів.

Для проведення порівняльного аналізу вибрані найбільш характерні й визначальні конструктивні та експлуатаційні параметри:

- маса спорядженого електробуса;
- повна конструктивна маса;
- довжина кузова електробуса;
- номінальна пасажиромістимість;
- енергоємність тягових АКБ;
- автономний пробіг без підзарядження тягових АКБ.

На основі використання цих параметрів запропоновані наступні критерії ефективності конструкцій міських електробусів:

- коефіцієнт конструктивної ефективності електробусів за спорядженою масою, довжиною кузова та номінальною пасажиромістимістю;

- коефіцієнт експлуатаційної ефективності електробусів за номінальною пасажиромістимістю, величиною автономного пробігу, повною конструктивною масою та енергопотужністю тягових АКБ;

- узагальнений коефіцієнт економічної ефективності (доцільності) експлуатації електробусів.

Для проведення порівняльного аналізу з огляду на наявність та повноту відображення необхідної інформації у відкритих джерелах вибрані наступні моделі сучасних міських електробусів – дві СКл та три великого (ВКл) класів:

- SOR EBN 8 – електробус СКл виробництва чеської компанії "SOR Libchavy";
- "Karsan e-Atak" – електробус СКл виробництва турецької компанії "Karsan Otomotiv Sanayii ve Ticaret A.Ş.";
- E490 "Vivovt" – електробус ВКл виробництва білоруського ВАТ "ВКМ Holding";
- E19 "Електрон" – електробус ВКл віт-

чизняного виробника ПрАТ "Концерн "Електрон";

- "Lion City 12e" – електробус ВКл виробництва німецької компанії MAN SE.

Основні конструктивні та експлуатаційні параметри вибраних для порівняльного аналізу моделей міських електробусів різних типорозмірів наведені у таблиці 6.

Таблиця 6. Основні технічні параметри міських електробусів середнього і великого класів типу ONC

Клас електробуса за довжиною кузова	Середній		Великий		
Модель електробуса	SOR EBN 8	Karsan e-Atak	E490	Електрон E19	Lion C[ty 12e
Компонувальна схема:					
- за колісною формулою	4x2.2		4x2.1	4x2.2	
- за формулою пасажирських дверей	1-2-0		0-2+2-0	2-2-2	2-2-0
Розмірні параметри кузова, м:					
- довжина/ ширина	8,0/ 2,525	8,315/ 2,43	9,58/ 2,55	12,0/ 2,55	12,2/ 2,55
- колісна база	3,95	4,58	7,15	5,9	6,005
- звиси – передній/ задній	2,35/ 1,70	2,04/ 1,695	1,41/ 0,94		
Параметри мас, кг:					
- споряджена маса	9205	7532	10512	13560	13516
- повна конструктивна маса	12675	11000	15000	19000	19500
- допустима повна маса	16500	-	18000	19500	
Параметри вмістимості, чол.					
- номінальна вмістимість	51		66	80	88
- в т.ч. сидячих/ стоячих пасажирів	16/ 35	21/30	21/ 45	34/ 46	25/ 63
Параметри тягового приводу:					
- тип тягового моста	балковий	балковий	розрізний	портальний	
- типорозмір шин коліс	285/70 R 19,5	245/70 R 17,5 225/70 R 17,5	275/70 R22,5 385/55 R22,5	R22,5	
- номінальна потужність ЕД, кВт	120,0	115,0	120,0	2x120,0	160,0
Параметри автономних ДВЕ:					
- тип	LiFePO ₄			NMC	
- енергоємність, кВт·год.	172,0	220	167,0	290,0	480
Автономний пробіг, км	150-180 (145*)	(213*)	170 (119*)	(163*)	200 (262*)

Примітка: *Розрахована величина автономного пробігу з виразу (9), за прийнятими в роботі величинами відповідних параметрів

Коефіцієнт конструктивної ефективності електробусів, який враховує їх основні визначальні конструктивні параметри – номінальну пасажиромістимість, довжину кузова та масу електробуса у спорядженому стані, визначається за пропонуваним виразом:

$$E_{\text{эф}}^{\text{к}} = k_{\text{к}} \frac{N_{\text{пас}}^{\text{н}}}{10^{-3} M_{\text{сп}}^{\text{е}} L_{\text{куз}}} \quad (12)$$

де $k_{\text{к}}$ – коефіцієнт, розмірність якого – чол./кг·м.

Коефіцієнт експлуатаційної ефективності електробусів, який враховує групу експлуатаційних визначальних параметрів, зокрема, номінальну пасажиромістимість, величину автономного пробігу без додаткового зарядження тягових АКБ, енергоємність блоків тягових АКБ та повну конструктивну масу, визначається за наступним пропонуваним виразом:

$$E_{\text{еф}}^{\text{е}} = k_e \frac{0,1N_{\text{пас}}^{\text{н}} \sum_{i=1}^n L_{M_i}}{W_{\text{акб}} M_{\text{п}}^{\text{е}}}, \quad (13)$$

де k_k – коефіцієнт, розмірність якого чол.·м/кВт·год.·кг.

Узагальнений коефіцієнт економічної ефективності або доцільності експлуатації тієї чи іншої моделі міського електробуса типу ONC визначається наступним чином:

$$E_{\text{еф}} = (E_{\text{кеф}} + E_{\text{сеф}}) - 0,5. \quad (14)$$

Таблиця 7. Коефіцієнти ефективності та технічної досконалості міських електробусів типу ONC різних класів за довжиною кузовів

Модель електробуса	АПП-С01	АПП-С02	АПП-С03	SOR EBN 8	Karsan e-Atak	E490	Електрон Е19	Lion City 12e
Коефіцієнт конструктивної ефективності, $E_{\text{еф}}^{\text{к}}$	0,787	0,737	0,67	0,692	0,814	0,655	0,492	0,534
Коефіцієнт експлуатаційної ефективності, $E_{\text{еф}}^{\text{е}}$	0,342	0,322	0,29	0,339	0,449	0,313	0,237	0,246
Узагальнений коефіцієнт економічної ефективності, $E_{\text{еф}}$	0,629	0,559	0,46	0,531	0,763	0,468	0,229	0,28

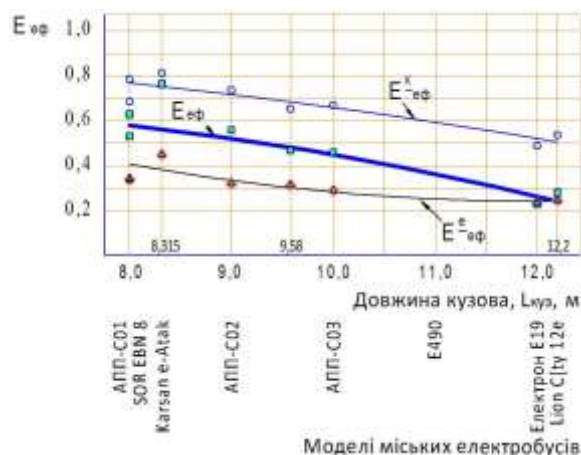


Рис. 3. Коефіцієнти конструктивної, експлуатаційної та економічної ефективності міських електробусів різних типорозмірів

– із моделей розроблених проектів та наведених міських електробусів найвищий коефіцієнт конструктивної ефективності належить моделі "Karsan e-Atak" – $E_{\text{кеф}} = 0,763$, хоча за пасажиромістимістю вона поступається пропонованому проекту АПП-С01 аж на 13 чол., для якого $E_{\text{кеф}} = 0,629$;

– очевидно, що при близькій довжині кузовів електробусів проекту АПП-С01 та моделі "Karsan e-Atak", відповідно, 8,0 м та 8,315

Розрахункові величини коефіцієнтів конструктивної, експлуатаційної та економічної ефективності міських електробусів типу ONC розроблених проектів та порівнюваних сучасних моделей наведені у таблиці 7.

Аналіз коефіцієнтів ефективності міських електробусів типу ONC (рис. 3) показує, що:

– зі збільшенням довжини кузовів величина коефіцієнта конструктивної ефективності міських електробусів $E_{\text{еф}}^{\text{к}}$ пропорційно зменшується;

м, вища величина коефіцієнта конструктивної ефективності моделі "Karsan e-Atak" пояснюється застосуванням суттєво легших керованого й тягового мостів та коліс типорозміру R17,5, а також більш легких конструкційних матеріалів;

– за конструктивною ефективністю міські електробуси СКЛ розроблених проектів у 1,36-1,47 разів переважають моделі електробусів ВКЛ, довжина кузовів яких становить 12,0-12,2 м, тобто більшими, щонайменше, на 2,0-2,2 м;

– величини коефіцієнтів експлуатаційної ефективності міських електробусів СКЛ більші ніж у моделей електробусів ВКЛ з кузовами довжиною 12,0 м і 12,2 м на 17,9-22,4 % (проект АПП-С03), на 30,9-35,9 % (АПП-С02 та на 39,0-44,3,3 % (АПП-С01);

– електробус СКЛ моделі E490, довжина кузова якого рівна 9,58 м, за коефіцієнтами конструктивної та експлуатаційної ефективності близький до електробуса пропонованого проекту АПП-С03 з довжиною кузова, меншою на 0,58 м.

Висновки

Результати проведених досліджень з визначення показників ефективності конструкцій

міських електробусів різних типорозмірів показують, що:

– номінальна пасажиромістимість електробуса проекту АПП-С03 (83 чол.) з довжиною кузова 10,0 м фактично близька до вмістимостей електробусів ВКл з довжиною кузовів 12,0 м моделі Е19 "Електрон" (80 чол.) та 12,2 м моделі "Lion City 12e" (88 чол.);

– повна конструктивна маса електробуса проекту АПП-С03, рівна 18030 кг, менша аналогічного параметра електробусів ВКл моделі Е19 "Електрон" на 970 кг і моделі "Lion City 12e" на 1470 кг;

– міські електробуси СКл усіх пропонованих проектів, розроблених на основі інноваційної компоувальної схеми за розміщенням лівого і правого коліс керованого моста, за узагальненим коефіцієнтом економічної ефективності у 1,64-2,75 разів переважають моделі електробусів ВКл і ОВКл з довжиною кузовів біля 12,0 та 12,2 м, зокрема, проекту АПП-С01 у 2,25-2,75 разів, АПП-С02 у 2,0-2,44 разів та АПП-С03 у 1,64-2,01 разів.

Окрім того, до дуже важливих факторів вибору моделей міських електробусів для застосування на міських маршрутах різних міст належить їх ринкова вартість. Очевидно, що ринкова вартість електробусів СКл з меншими за довжиною кузовами та меншими енергопотужностями блоків тягових АКБ при ідентичних конструкціях і однакових застосованих матеріалах для їх виготовлення, буде нижчою у порівнянні з вартістю електробусів ВКл.

Отже, проектування, освоєння виробництва вітчизняними підприємствами та застосування інноваційних міських електробусів СКл з довжиною кузовів 8,0-10,0 м типу ОНС являється не тільки абсолютно доцільним, але і єдино прийнятним напрямком розвитку конструкцій міських електробусів.

Більше того, з огляду на суттєво більшу не-підресорену масу тягових мостів порталного типу електробусам пропонованих проєкцій притаманні і ряд інших переваг, зокрема, менша руйнівна дія на покриття міських вулиць та значно вища зручність користування ними за рахунок відсутності арок коліс керованого і тягового мостів у проходах по пасажирських салонах. Важливим являється і такий фактор, як суттєво менший вплив на зменшення середньої швидкості руху транспортних засобів по міських вулицях, особливо з мінімальною шириною та однонаправленим рухом.

Електробуси типу ОНС пропонованих проєктів АПП-С01 (8,0 м) і АПП-С02 (9,0 м)

повинні застосовуватися на міських маршрутах, відповідно, з низькою і середньою інтенсивністю пасажиропотоків, а електробуси проекту АПП-С03 мають замінити електробуси ВКл та ОВКл такого ж типу з довжиною кузовів 12,0-12,35 м.

Конфлікт інтересів

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

Література

1. Meishner, F. & Uwe Sauer, D. (2020). Technical and economic comparison of different electric bus concepts based on actual demonstrations in European cities. *IET Electrical Systems in Transportation*. 10(2). 144-153. <https://doi.org/10.1049/iet-est.2019.0014>
2. Mahmoud, M., Garnett, R. & Kanaroglou, P. (2016). Electric buses: A review of alternative powertrains. *Renewable & Sustainable Energy Reviews*. 62. 673-684. <https://doi.org/10.1016/J.RSER.2016.05.019>
3. Dirks, N., Schiffer, M. & Walther, G. (2021). On the Integration of Battery Electric Buses into Urban Bus Networks. 1-25. Retrieved from <https://www.researchgate.net/publication/350341739>.
4. Houbbadi, A., Pelissier, S., Trigui, R., Redondo-Iglesias, E. & Bouton, T. (2019). Overview of Electric Buses deployment and its challenges related to the charging – the case study of TRANSDEV. *EVS32 International Electric Vehicle Symposium*. 1-11. <https://doi.org/hal.archives-ouvertes.fr/hal-02148377/document>.
5. Verbrugge, B., Hasan, M. M, Rasool, H., Geury, T., Baghdadi M. E. & mar Hegazy, O. (2021). Smart Integration of Electric Buses in Cities: A Technological Review. *Sustainability*. 13, 12189. <https://doi.org/10.3390/su132112189>
6. Olmos, J., Lopez-Ibarra, J. A. & Herrera, V. (2019). Analysis of Optimal Charging Points Location and Storage Capacity for Hybrid and Full Electric Buses. *Fourteenth International Conference on Ecological Vehicles and Renewable Energies (EVER)*. 1-7. <https://doi.org/10.1109/EVER.2019.8813576>
7. Lotfi M., Pereira P., Paterakis N., Gabbar H. A. & Catal?o J. P. S. (2020). Optimizing Charging Infrastructures of Electric Bus Routes to Minimize Total Ownership Cost. *IEEE International Conference on Environment and Electrical Engineering and IEEE Industrial and Commercial Power Systems Europe (EEEIC / I&CPS Europe)*, Madrid, Spain. 1-6.

- <https://doi.org/10.1109/EEEEIC/ICPSEurope49358.2020.9160687>
8. Campos, M., Mensi J. & Estrada M. (2021). Charging operations in battery electric bus systems at the depot. 14th Conference on Transport Engineering: 6th – 8th July 2021. Transportation Research Procedia. 58, 103-110. <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2021.11.015>
 9. Gong J, He J, Cheng C, King M, Yan X, He Z & Zhang H. Road. (2020). Test-Based Electric Bus Selection: A Case Study of Nanjing Bus Company. Energies,13(5):1253. <https://doi.org/10.3390/en13051253>
 10. Ji, J., Bie, Y., Zeng, Z. & Wang L. (2022). Trip energy consumption estimation for electric buses. Communications in Transportation Research, 2. <http://dx.doi.org/10.1016/j.commtr.2022.100069>.
 11. Borz, S. (2020). Electric buses' sustainability effects, noise, energy use, and costs, International Journal of Sustainable Transportation. 14:12, 956-971. <https://doi.org/10.1080/15568318.2019.1666324>
 12. Войтків С. В. (2019). Напрямки створення конкурентоспроможних міських електробусів великого класу. Збірник наукових матеріалів міжнародної науково-практичної інтернет-конференції "Інноваційні технології розвитку та ефективності функціонування автомобільного транспорту". Кропивницький : ЦНТУ. Voitkiv S. V. (2019). Napriamky stvorennia konkurentospromozhnykh miskykh elektrobisiv velykoho klasu [Directions of creation of competitive city electric buses of a large class. Collection of scientific materials of the international scientific-practical Internet conference "Innovative technologies of development and efficiency of functioning of motor transport"]. Zbirnyk naukovykh materialiv mizhnarodnoi naukovo-praktychnoi internet-konferentsii "Innovatsiini tekhnologii rozvytku ta efektyvnosti funktsionuvannia avtomobilnoho transportu". Kropyvnytskyi : CNTU, 13–24. [in Ukrainian].

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

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

The assessment of the feasibility of designing, manufacturing and operating middle-class innovative urban electric buses

Abstract. Problem. City electric buses are increasingly being utilized for passenger transportation in developed countries worldwide. Currently, there are various types of city electric buses being manufactured and operated, differing in their autonomous electric energy sources and charging systems. These include the ONC type with overnight charging of traction batteries and the OS type with ultra-fast charging

of traction batteries or supercapacitors during stops. However, these electric buses also vary in their body length, ranging from 5.85 to 15.0 meters for individual models. Although large-class city electric buses with a body length of approximately 12.0 meters are commonly used, concerns have been raised regarding their operational effectiveness. **Goal:** This study aims to evaluate the feasibility of designing and implementing small-scale production of competitive middle-class city electric buses with a body length of 8.0-10.0 meters at Ukrainian enterprises, and to assess their suitability for operation on city routes. **Methodology:** The feasibility evaluation of middle-class city electric buses is based on an analysis of the technical parameters of promising ONC-type middle-class city electric buses. The study includes the development of conceptual sketch projects based on a proposed layout scheme utilizing a 4x2.1 wheel formula. Operational parameters of these sketch projects are compared with electric bus analogues of similar and other standard sizes. **Results:** Three versions of conceptual sketch projects for promising urban electric buses of the ONC type, with body lengths of 8.0 meters, 9.0 meters, and 10.0 meters, have been developed. An analysis of their structural and operational parameters has been conducted, providing a relative assessment of the feasibility of their creation and utilization for passenger transportation on urban routes within domestic cities. **Originality:** The projects for promising middle-class urban electric buses are developed based on an original layout scheme, incorporating an asymmetrical arrangement of independent suspensions for the left and right wheels of the steering bridge, as well as the placement of two double passenger doors in the middle section of the bus bodies within the wheelbases. A method for determining the primary structural parameters of city electric buses of varying lengths during the development of conceptual proposals is proposed. **Practical Value:** The study presents a rational basis for creating and establishing the production of medium-class city electric buses of the ONC type, highlighting their operational and economic advantages compared to modern models, particularly large-class city electric buses produced by domestic companies. The study also provides recommendations for selecting optimal standard sizes of middle-class city electric buses for integration into urban passenger transportation systems in Ukraine's current stage of economic development.

Key words: first class electric bus; city electric bus of the ONC type; middle-class electric bus; passenger capacity of the electric bus; electric bus mass parameters; autonomous mileage.

Voytkiv Staniskav¹, Cand. of Science, General Designer, voitkivsv@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