

Методика оптимізації основних технічних параметрів перспективних міських електробусів типу ONC

Войтків С. В.¹

¹Науково-технічний центр «Автополіпром», Україна

Анотація. *Проблема.* Міські електробуси типу ONC, які широко застосовуються для перевезень пасажирів на міських маршрутах, навіть за збільшення допустимої повної маси на 1500 кг мають суттєво меншу пасажиромісткість ніж автобуси великого класу, на базі яких вони створені. **Мета.** Визначення оптимальних величин основних конструктивних та експлуатаційних параметрів перспективних електробусів. **Методологія.** На основі аналізу технічних параметрів міських електробусів сучасних конструкцій та регламентованих технічних вимог до пасажирських транспортних засобів великої вмістимості встановлені залежності їх пасажиромістимості від розмірних параметрів кузова, параметрів мас та величини автономного пробігу електробусів. **Результати.** Розроблені три варіанти методики оптимізації параметрів проєктованих міських електробусів за одним із заданих параметрів – номінальною пасажиромістимістю, середнім добовим автономним пробігом або довжиною кузова електробуса. **Оригінальність.** Запропонований алгоритм визначення оптимізованих параметрів проєктованих електробусів на стадії розроблення ескізних пропозицій та ескізних проєктів. **Практичне значення.** Запропонована методика забезпечує проєктування перспективних міських електробусів типу ONC, які найбільш придатні для застосування у містах України, з заданою або максимально можливою номінальною пасажиромістимістю з умови забезпечення заданого або максимально можливого автономного пробігу.

Ключові слова: електробус I-го класу; міський електробус; пасажиромістимість електробуса; параметри мас електробуса; оптимізація параметрів; автономний пробіг.

Вступ

Більшість моделей сучасних електробусів I-го класу провідних європейських виробників, зокрема, і двох вітчизняних підприємств – концерну «Електрон» та корпорації «Богдан», призначених для перевезень пасажирів на міських маршрутах, створені на основі застосування кузовів міських автобусів з довжиною кузова 12,0±0,3 м. Необхідність застосування автономних джерел електроенергії (ДЕЕ) для живлення тягових електродвигунів (ТЕД), систем їх підзаряджання під час перебування на маршрутах та комплексувальних виробів системи керування тяговим приводом, призвела до зменшення їх номінальної пасажиромістимості. Адже сумарна маса автономних ДЕЕ та інших складових частин тягового приводу електробусів

значно більша ніж маса силового агрегату з відповідними системами міських автобусів. Навіть за умови узаконеного збільшення допустимої повної маси електробусів на 1500 кг по відношенню до допустимої повної маси двомостових автобусів, вмістимість електробусів I-го класу у залежності від типу за енергопотужністю тягових акумуляторних батарей (АКБ) значно менша. При цьому, більша пасажиромістимість електробусів забезпечується за рахунок значного зменшення величини середньодобового автономного пробігу.

Отже, проєктування конструкцій сучасних перспективних міських електробусів з метою організації їх виробництва на вітчизняних підприємствах повинно базуватися виключно на оптимізації їх основних конструктивних і

експлуатаційних параметрів – номінальної пасажировмістимості, розмірних параметрів, параметрів мас та автономного пробігу.

Аналіз публікацій

Ефективність експлуатації електробусів I-го класу залежить, зокрема, від оптимізації їх основних конструктивних та експлуатаційних параметрів: номінальної пасажировмістимості, розмірних параметрів кузова, особливо його довжини, параметрів мас та автономного ходу. Дослідження різних аспектів ефективності експлуатації сучасних міських електробусів різних типів наведені у багатьох роботах. Оцінка сумарних витрат на застосування електробусів для перевезень пасажирів на конкретному маршруті та необхідні обсяги річної витрати електроенергії наведені у [1]. Залежність витрат електроенергії, необхідної для руху електробусів на маршруті, від типових циклів, кліматичних умов та стилю водіння конкретного водія розглянута у роботі [2]. Аналіз переваг та недоліків автобусів з гібридним приводом та електробусів, обладнаних тяговими АКБ або паливними елементами наведений у [3, 4]. Аналіз процесу заряджання ДЕЕ, зокрема, тягових АКБ електробусів типу ONC у нічний час розглянута у роботах [5, 6]. Напрямки подовження термінів експлуатації тягових АКБ запропоновані у [7]. Вплив основних конструктивних, експлуатаційних та інших факторів на споживання електроенергії міськими електробусами під час перевезень пасажирів розглянутий у роботах [8-10].

У наведених роботах авторами показано, що експлуатаційна ефективність електробусів залежить, зокрема, від основних конструктивних параметрів – маси спорядженого електробуса, маси тягових АКБ та номінальної пасажировмістимості.

Мета та постановка задачі

Метою роботи є розроблення методики оптимізації основних конструктивних та експлуатаційних параметрів перспективних електробусів типу ONC – номінальної пасажировмістимості, розмірних параметрів кузова, зокрема, довжини, маси тягових АКБ та автономного пробігу.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити наступні задачі:

- визначити залежність маси кузовів

електробусів без урахування маси тягових АКБ від їх розмірних параметрів та від основних конструкційних матеріалів;

- визначити залежність номінальної пасажировмістимості від площі пасажирського салону, параметрів горизонтальної проекції кузовів електробусів і від кількості встановлених одинарних пасажирських сидінь;

- визначити залежність максимально допустимої пасажировмістимості за параметрами мас – допустимої повної маси електробусів і маси у спорядженому стані, та від автономного пробігу.

Аналіз пасажировмістимості сучасних електробусів типу ONC

Електробуси типу ONC (англ. *Over Night-Charging*) характеризуються наявністю великої кількості тягових АКБ, розміщених на даху кузовів, або безпосередньо, у кузовах – у задній частині або у відокремлених відсіках, сформованих під пасажирськими сидіннями. Вона пов'язана з застосуванням системи заряджання тягових АКБ виключно від зарядних станцій розміщених, зазвичай, на територіях автотранспортних підприємств або поблизу них. Заряджання тягових АКБ таких електробусів здійснюється, здебільшого, у нічну пору доби.

Основними недоліками сучасних міських електробусів усіх типів, особливо типу ONC, являються суттєво збільшена маса у спорядженому стані та значно менша пасажировмістимість у порівнянні з міськими автобусами аналогічної довжини. Та, незважаючи на значно меншу пасажировмістимість електробусів великого класу з довжиною кузовів $12,0 \pm 0,2$ м, яка становить всього 65-80 чол., у порівнянні з міськими автобусами аналогічної довжини – 100-105 чол., саме цей тип електробусів являється найбільш доцільним для створення нових перспективних моделей, організації їх виробництва та експлуатації на міських маршрутах.

Але навіть збільшення регламентованої допустимої повної маси електробусів до $[M_{\text{п}}^{\text{е}}] = 19500$ кг, тобто на 1500 кг, оскільки для двомостових автобусів $[M_{\text{п}}^{\text{а}}] = 18000$ кг, їх номінальна пасажировмістимість все ж на 20-45 чол. менша.

Отже, проектування, виробництво та експлуатація перспективних міських електробу-

сів типу ОНС на основі застосування кузовів міських автобусів великого класу з довжиною $12,0 \pm 0,2$ м являється економічно недоцільним. Проектування перспективних міських електробусів типу ОНС, який найбільш придатний для застосування в Україні, повинно здійснюватися, принаймні, двома шляхами:

- оптимізацією основних конструктивних та експлуатаційних параметрів – номінальної пасажировмістимості, довжини кузова та автономного пробігу, зокрема, і при застосуванні компоувальних схем з колісною формулою 4×2.2 (зі здвоєними колесами тягового моста);
- застосуванням компоувальних схем з колісною формулою 4×2.1 (з одинарними колесами тягового моста) та розміщенням пасажирських дверей у межах колісної бази електробусів.

Параметри пасажировмістимості міських електробусів

До параметрів пасажировмістимості міських електробусів (автобусів, тролейбусів) належать: номінальна вмістимість, кількість встановлених у салоні пасажирських сидінь, кількість пасажирів, яких допускається перевозити у стоячому положенні, кількість місць для розміщення пасажирів у інвалідних візках.

Вимогами Правил ЄЕК ООН № 107 [11] регламентовані наступні параметри:

- мінімальна кількість пасажирських сидінь, яка повинна бути встановлена у пасажирських салонах міських електробусів без урахування сидіння для службової особи;
- питома площа для розміщення 1-го стоячого пасажиря, яка для міських електробусів становить $q_{\text{пас}} = 0,125 \text{ м}^2/\text{пас.}$;
- площа ділянки підлоги пасажирського салону для розміщення пасажиря у інвалідному візку, розміри якої, не менше: довжина – 1,3 м, ширина – 0,75 м.

Мінімальна кількість стаціонарних одинарних пасажирських сидінь, встановлених пасажирських салонах міських електробусів, залежить від площі пасажирського салону. Допускається застосування відкидних пасажирських сидінь, але вони не враховуються при визначенні мінімальної кількості сидінь.

Номінальна пасажировмістимість міських електробусів обмежується двома основними конструктивними факторами:

- площею пасажирського салону елект-

робуса, призначеною для встановлення пасажирських сидінь та розміщення пасажирів у інвалідних візках і у стоячому положенні;

- допустимою корисною масою усіх пасажирів, які можуть бути розміщені на пасажирських сидіннях та на тих ділянках пасажирського салону, які призначені для стоячих пасажирів.

Визначення пасажировмістимості міських електробусів за площею пасажирського салону

Загальна пасажировмістимість міських електробусів за площею підлоги пасажирського салону, на якій можуть бути розміщені пасажирські сидіння та пасажирі у інвалідних візках і у стоячому положенні, визначається за виразом

$$N_{\text{пас}}^s = n_{\text{сид}}^i + n_{\text{віз}} + n_{\text{ст}} - n_{\text{сл}}, \quad (1)$$

де $n_{\text{сид}}^i$ – кількість пасажирів, розміщених у стаціонарних пасажирських сидіннях, чол.; $n_{\text{віз}}$ – кількість пасажирів у інвалідних візках, чол.; $n_{\text{ст}}$ – кількість стоячих пасажирів, чол.; $n_{\text{сл}}$ – кількість службових осіб, для розміщення яких виділені окремі сидіння, чол.

Оскільки, у міських електробусах службові особи (кондуктори) практично не передбачені, вираз (5) матиме вигляд

$$N_{\text{пас}}^s = n_{\text{сид}}^i + n_{\text{віз}} + n_{\text{ст}}. \quad (1.1)$$

Пасажирські одинарні сидіння можуть бути встановлені у пасажирському салоні міських електробусів в одному з трьох варіантів:

- у мінімально допустимій кількості одинарних стаціонарних сидінь;
- у максимально можливій кількості одинарних стаціонарних сидінь за умови забезпечення необхідної кількості накопичувальних майданчиків та розміщення регламентованої кількості пасажирів у інвалідних візках;
- у будь-якій можливій кількості стаціонарних одинарних сидінь, більшій ніж мінімально допустима, та можливій кількості відкидних сидінь.

Мінімально допустима кількість стаціонарних одинарних пасажирських сидінь у са-

лонах міських електробусів визначається з умови:

$$0,9S_{\text{пс}} \leq n_{\text{сид}}^{\text{min}} \leq S_{\text{пс}}, \quad (2)$$

де $S_{\text{пс}}$ – площа пасажирського салону для розміщення пасажирських сидінь та стоячих пасажирів, м^2 , яка визначається з виразу:

$$S_{\text{пс}} = S_{\text{куз}} - S_{\text{вод}}, \quad (3)$$

де $S_{\text{куз}}$ – площа горизонтальної проекції кузова електробуса, м^2 ; $S_{\text{вод}}$ – площа відділення

водія, відокремленого від пасажирського салону, м^2 :

$$S_{\text{куз}} = L_{\text{куз}} B_{\text{куз}}, \quad (4)$$

де $L_{\text{куз}}$ і $B_{\text{куз}}$ – відповідно, довжина і ширина кузова електробуса, м.

Усі сучасні міські електробуси класичного компонування з одинарними або подвійними пасажирськими дверима у передньому звісі, обладнані відокремленим відділенням водія (рис. 1), площі яких, визначені графічним методом, наведені у табл. 1.

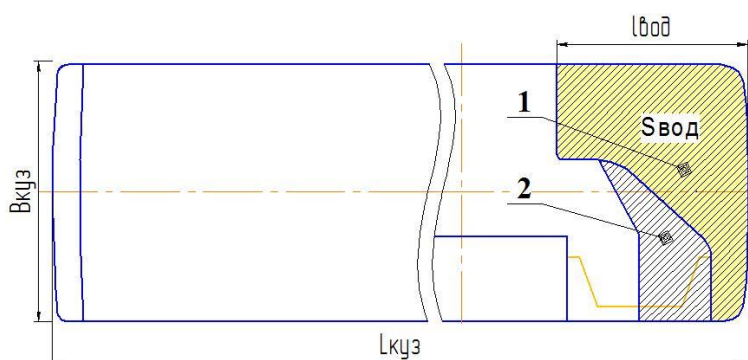


Рис. 1. Схема відділення водія міських електробусів: 1 – відокремленого частково, з входом із пасажирського салону; 2 – відокремленого повністю, з окремим входом

Таблиця 1. Площі різних типів відділень водія сучасних міських електробусів

Тип відділення водія	Відокремлене	
	частково	повністю
Площа відділення водія, $S_{\text{вод}}, \text{м}^2$	2,6-2,7	3,5-3,6

Допустима мінімальна кількість стаціонарних одинарних пасажирських сидінь у залежності від типу відділення водія у пасажирських салонах міських електробусів наведена у табл. 2.

Таблиця 2. Допустима мінімальна кількість пасажирських сидінь у салонах міських електробусів

Розмірні параметри кузова електробуса, м:	Кількість пасажирських сидінь, $n_{\text{сид}}^{\text{min}}$, од.			
	9,0	10,0	11,0	12,0
- довжина, $L_{\text{куз}}$				
- ширина, $B_{\text{куз}}$	2,55			
Тип відділення водія, відокремлене:				
- частково	18	21	23	25
- повністю	17	20	22	24

Максимальну кількість пасажирських сидінь, які можуть бути встановлені у пасажирському салоні міського електробуса, пропонується визначати за виразом:

$$n_{\text{сид}}^{\text{max}} \leq k_{\text{сид}} L_{\text{куз}}, \quad (5)$$

де $k_{\text{сид}}$ – коефіцієнт кількості одинарних пасажирських сидінь в залежності від довжини кузова автобуса, сид./м.

Рекомендована величина $k_{\text{сид}}$, визначена на основі аналізу технічних параметрів двомостових міських електробусів класичної компонування з колісною формулою 4x2.2 з довжиною кузова 9,0-12,0 м та шириною 2,5-2,55 м, $k_{\text{сид}} = (3,25-3,35)$ сид./м.

Розрахункова максимальна кількість пасажирських сидінь, які можуть бути встановлені у пасажирському салоні міських електробусів різної довжини наведена у табл. 3.

Таблиця 3. Розрахункова максимальна кількість одинарних пасажирських сидінь у салонах міських електробусів

Довжина кузова електробуса, $L_{\text{куз}}$, м	9,0	10,0	11,0	12,0
Кількість пасажирських сидінь, $n_{\text{сид}}^{\text{max}}$, од.	30	33	36	40

Кількість стоячих пасажирів, які можуть розміститися у пасажирському салоні міських електробусів, визначається за виразом:

$$n_{\text{ст}} \leq \frac{S_{\text{ст}}}{q_{\text{пас}}}, \quad (6)$$

де $S_{\text{ст}}$ – площа підлоги пасажирського салону, на якій можуть розміщатися пасажирів у стоячому положенні, м^2 .

Площа підлоги пасажирського салону, на якій допускається розміщення пасажирів у стоячому положенні, визначається за виразом:

$$S_{\text{ст}} = S_{\text{пс}} - n_{\text{сид}} s_{\text{сид}} - \left(\sum_{i=2}^n (n_{\text{дв}_i} s_{\text{дв}_i}) + \sum_{i=1}^n S_i \right), \quad (7)$$

де $s_{\text{сид}}$ – площа горизонтальної проекції одинарного пасажирського сидіння з зоною для розміщення ніг пасажирів, м^2 ; $n_{\text{дв}_i}$ – кількість пасажирських дверей однакового типу і однакової ширини по проїмі, од.; $s_{\text{дв}_i}$ – площа, яку займають службові двері i -го типу у відчиненому стані, м^2 ; S_i – площа будь-якої іншої ділянки пасажирського салону, на якій не допускається розміщення стоячих пасажирів, м^2 (наприклад арки коліс керованого або тягового моста).

Площу, яку займає одинарне пасажирське сидіння з зоною для розміщення ніг сидячого пасажирів, рекомендується приймати рівною $s_{\text{сид}} = (0,37-0,4) \text{ м}^2/\text{сид}$.

Площа, яку займають пасажирські двері у відчиненому положенні пропонується визначати за виразом:

$$S_{\text{дв}_i} = k_{\text{дв}_i} b_{\text{дв}_i}, \quad (8)$$

де $k_{\text{дв}_i}$ – коефіцієнт, який враховує тип пасажирських дверей; $b_{\text{дв}_i}$ – ширина проїми дверей i -го типу у боковині кузова, м.

Для одинарних та подвійних пасажирських дверей обертово-поступального типу рекомендований $k_{\text{дв}}^{\text{оп}} = 0,24-0,25$, для одинарних та подвійних пасажирських дверей плоскопаралельного переміщення, які відчиняються ззовні кузова, $k_{\text{дв}}^{\text{мп}} = 0,19-0,2$.

Сумарна площа інших ділянок підлоги пасажирського салону, на якій не можливе розміщення пасажирів у стоячому положенні, пов'язана зі щільності планування пасажирського салону проєктованих перспективних міських електробусів, визначається за пропозованим виразом у залежності від його довжини:

$$\sum_{i=1}^n S_i = 0,14 L_{\text{куз}} + (0,8 \dots 2,6). \quad (9)$$

Розрахункова вмістимість міських електробусів за площею пасажирського салону може мати кілька значень у залежності від кількості встановлених пасажирських сидінь:

$$N_{\text{пас1}}^s = n_{\text{сид}}^{\text{min}} + n_{\text{ст}}; \quad (10.1)$$

$$N_{\text{пас2}}^s = n_{\text{сид}}^{\text{max}} + n_{\text{ст}}; \quad (10.2)$$

$$N_{\text{пас1}}^s = n_{\text{сид}}^{\text{min}} + n_{\text{ст}} + n_{\text{виз}}; \quad (10.3)$$

$$N_{\text{пас2}}^s = n_{\text{сид}}^{\text{max}} + n_{\text{ст}} + n_{\text{виз}}. \quad (10.4)$$

Оскільки площа ділянки підлоги у пасажирському салоні, яку займає один інвалідний візок, рівна $1,3 \times 0,7 = 0,91 \text{ м}^2$, і на ній можуть розміститися 7 чол. у стоячому положенні, вирази (10.3 та 10.4) можна записати у наступному вигляді:

$$N_{\text{пас3}}^s = n_{\text{сид}}^{\text{min}} + (n_{\text{ст}} - 7); \quad (11.1)$$

$$N_{\text{пас4}}^s = n_{\text{сид}}^{\text{max}} + (n_{\text{ст}} - 7). \quad (11.2)$$

У загальному випадку розрахункова пасажирівмістимість міських електробусів за площею пасажирського салону при відсутності сидіння для службової особи визначається за узагальненим виразом:

$$N_{\text{пас}}^s = n_{\text{сид}} + (n_{\text{ст}} - 7 n_{\text{виз}}). \quad (12)$$

Застосування у конструкціях міських електробусів повністю відокремленого від пасажирського салону відділення водія зменшує пасажировмістимість на:

$$\Delta n_{\text{пас}}^{\text{вод}} = \frac{S_{\text{вод}}^{\text{пв}} - S_{\text{вод}}^{\text{чв}}}{q_{\text{ст}}}, \quad (13)$$

де $S_{\text{вод}}^{\text{пв}}$ – площа відділення водія, повністю відокремленого від пасажирського салону, м²; $S_{\text{вод}}^{\text{чв}}$ – площа частково відокремленого від салону відділення водія, м².

Для наведених у табл. 1 площ відділень водія $\Delta n_{\text{пас}}^{\text{вод}} = 7-8$ чол. Отже, вираз (12) для визначення пасажировмістимості міських електробусів можна записати у ще більш узагальненому вигляді:

$$N_{\text{пас}}^s = n_{\text{снд}} + (n_{\text{ст}} - 7n_{\text{виз}}) \pm (7...8), \quad (14)$$

де знаки "+" і "-" застосовуються при визначенні $n_{\text{ст}}$ з урахуванням площі відділення водія, відповідно, відокремленого повністю або частково.

Визначення пасажировмістимості міських електробусів за допустимою повною масою

Загальна пасажировмістимість міських електробусів за допустимою повною масою залежить маси спорядженого електробуса, яка, у свою чергу, суттєво залежить від типу та енергопотужності тягових АКБ, і визначається за виразом:

$$N_{\text{пас}}^s = \frac{1}{m_{\text{пас}}} (M_{\text{п}}^e - M_{\text{сп}}^o - m_{\text{акб}} - n_{\text{сл}} m_{\text{вод}}), \quad (15)$$

де $M_{\text{сп}}^o$ – маса спорядженого електробуса без маси тягових АКБ, кг; $m_{\text{акб}}$ – маса тягових АКБ, кг; $n_{\text{сл}}$ – кількість службових осіб (водій, кондуктор), чол.; $m_{\text{вод}}$ – розрахункова маса службової особи, кг; $m_{\text{пас}}$ – розрахункова маса 1-го пасажера, кг.

Для міських електробусів відповідно вимогам Правил ЕЭК ООН № 107 маса службової особи $m_{\text{вод}} = 75$ кг, маса 1-го пасажера $m_{\text{пас}} = 68$ кг.

Для визначення маси спорядженого електробуса без маси тягових АКБ з урахуванням того, що ширина їх кузовів при довжині понад 9,0 м близька і рівна 2,5-2,55 м, а висота кузовів сучасних низькопідлогових електробусів рівна 2,6-2,7 м, відрізняється всього на 3,8 %, застосовується вираз, запропонований в [12]:

$$M_{\text{сп}}^o = \Delta m_{\text{сп}}^o L_{\text{куз}}, \quad (16)$$

де $\Delta m_{\text{сп}}^o$ – питома споряджена маса електробусів-аналогів без маси тягових АКБ, кг/м.

Питома споряджена маса кузовів міських електробусів, для виготовлення каркасів яких застосовуються сталеві профілі, а для панелей зовнішнього облицювання та внутрішнього оздоблення – композиційні матеріали, $\Delta m_{\text{сп}}^o = 850-900$ кг/м. Для проектування перспективних моделей міських електробусів пропонується приймати $\Delta m_{\text{сп}}^o = 850-870$ кг/м.

Маса тягових АКБ залежить від їх типу за будовою та номінальної енергопотужності:

$$m_{\text{акб}} = \frac{W_{\text{акб}}}{\rho_{\text{акб}}^w}, \quad (17)$$

де $W_{\text{акб}}$ – номінальна енергопотужність тягових АКБ, кВт·год.; $\rho_{\text{акб}}^w$ – питома енергопотужність тягових АКБ, кВт·год./кг.

Для основних типів сучасних тягових АКБ, які на нинішній час найчастіше застосовуються у системах тягового приводу електробусів для живлення ТЕД, рекомендовані величини питомої енергопотужності становлять: для тягових АКБ типу LiFePO_4 $\rho_{\text{акб}}^w = 0,09-0,1$ кВт·год./кг, а типу $\text{Li}_4\text{Ti}_5\text{O}_{12}$ – $\rho_{\text{акб}}^w = 0,07-0,08$ кВт·год./кг.

Оптимізація основних конструктивних та експлуатаційних параметрів перспективних міських електробусів

Оптимізація найбільш визначальних технічних параметрів проєктованих міських електробусів на етапах розроблення ескізних пропозицій або початкових стадіях розроблення ескізних проєктів у залежності від заданих вихідних параметрів може здійснюватися по одному із наступних варіантів:

- варіант $N_{\text{пас}}^h$ – задана номінальна пасажировмістимість електробуса, чол.;

- варіант $L_{пр}$ – задана величина середньодобового автономного пробігу, км;
- варіант $L_{куз}^{пр}$ – задані довжина кузова електробуса, $L_{куз}$, м та середньодобовий автономний пробіг, $L_{пр}$, км.

Оптимізація основних параметрів міських електробусів за варіантом $N_{пас}^H$

За умови заданої величини номінальної па-

$$L_{куз} \geq \frac{q_{пас} N_{пас}^H + n_{віз} s_{віз} + S_{вод} + \sum_{i=2}^n (n_{дв_i} s_{дв_i}) + \sum_{i=1}^n S_i}{q_{пас} k_{сид} + B_{куз} - k_{сид} s_{сид}}. \quad (18)$$

Автономний добовий пробіг міського електробуса розраховується за виразом, наведеним у [12]:

$$L_{пр} = \frac{k_p \rho_{акб}^w m_{акб}}{\Delta w_m M_{п}^e}, \quad (19)$$

де k_p – коефіцієнт допустимого розрядження тягових АКБ; Δw_m – питома витрата енергопотужності тягових АКБ, кВт·год./кг·км; $M_{п}^e$ – розрахункова повна маса електробуса, кг.

Для тягових АКБ типу $LiFePO_4$ $k_p = 0,85-9$; $\rho_{акб}^w = 0,09-0,1$ кВт·год./кг, а $\Delta w_m = (0,07-0,08)10^{-3}$ кВт·год./кг·км.

Маса тягових АКБ визначається з виразу (15):

$$m_{акб} \leq M_{п}^e - (M_{сп}^o + m_{вод} + m_{пас} N_{пас}^H), \quad (20)$$

Оптимізація основних параметрів міських електробусів за варіантом $L_{пр}$

За умови заданого середньодобового пробігу

$$L_{куз} \geq \frac{[M_{п}^e] - m_{акб} - m_{вод} + \frac{m_{пас}}{q_{пас}} \left(S_{вод} + \sum_{i=2}^n (n_{дв_i} s_{дв_i}) + \sum_{i=1}^n S_i \right)}{\Delta m_{сп}^o + \frac{m_{пас}}{q_{пас}} (B_{куз} - k_{сид} s_{сид})}. \quad (23)$$

Маса спорядженого електробуса визначається за виразом (16), тоді

сажировмістимості проектного електробуса $N_{пас}^H$, визначенню підлягають довжина його кузова $L_{куз}$, допустима маса тягових АКБ $m_{акб}$ та величина можливого середньодобового автономного пробігу $L_{пр}$.

З виразів (1), (6) та (7) при заданій пасажировмістимості і відсутності кондуктора довжина кузова електробуса (18):

$L_{пр}$ проектного міського електробуса, визначенню та оптимізації підлягають наступні параметри: необхідна маса тягових АКБ $m_{акб}$, довжина кузова $L_{куз}$, маса спорядженого електробуса без маси тягових АКБ $M_{сп}^o$ та номінальна пасажировмістимість електробуса $N_{пас}^H$.

Необхідна маса тягових АКБ визначається з виразу (19):

$$m_{акб} = \frac{\Delta w_m M_{п}^e L_{пр}}{k_p \rho_{акб}^w}. \quad (21)$$

Довжина кузова проектного електробуса визначається на основі виразу:

$$[M_{п}^e] - m_{акб} - m_{вод} = M_{сп}^o + M_{пас}, \quad (22)$$

та виразів (1,1) при $n_{віз} = 0$, (6), (7), (9) і (16)

при прийнятій величині $\sum_{i=1}^n S_i = 3,25$ м²:

$$N_{пас}^H \leq \frac{[M_{п}^e] - m_{акб} - m_{вод} - M_{сп}^o}{m_{пас}}. \quad (24)$$

Оптимізація основних параметрів міських електробусів за варіантом $L_{куз}^{np}$

За умови заданої довжини кузова проектного електробуса $L_{куз}$ та заданого середньодобового автономного пробігу $L_{пр}$ за виразом (16) визначається споряджена маса електробуса без врахування маси тягових АКБ $M_{сп}^o$, за виразом (20) – необхідна маса тяго-

вих АКБ $m_{акб}$ та за виразом (23) його розрахункова номінальна пасажиромістимість $N_{пас}^H$ та максимальна кількість одинарних пасажирських сидінь $n_{сид}^{max}$. Для визначення пасажиромістимості за площею пасажирського салону за умови розміщення максимальної кількості сидінь $n_{сид}^{max}$ пропонується наступний вираз:

$$N_{пас}^s \leq k_{сид} L_{куз} + \frac{L_{куз} B_{куз} - S_{вод} - k_{сид} L_{куз} s_{сид} - n_{виз} s_{виз} - \sum_{i=2}^n (n_{дв_i} s_{дв_i}) - \sum_{i=1}^n S_i}{q_{пас}} \quad (25)$$

Інші розрахункові параметри, наприклад, пасажиромістимість за площею пасажирського салону при встановленні допустимої мінімальної кількості пасажирських сидінь визначаються, за необхідності, за відповідними виразами.

Оптимізація основних параметрів міських електробусів за різними варіантами

Результати розрахунків основних конструктивних та експлуатаційних параметрів проєктованих міських електробусів за заданих наступних вихідних параметрів:

- номінальна пасажиромістимість не менше $N_{пас}^H = 100$ чол.;
- середньодобовий автономний пробіг $L_{пр} = 200$ км;
- довжина кузова електробуса на рівні

довжини кузовів автобусів великого класу $L_{куз} = 12$ м, та прийнятих величин інших параметрів – $B_{куз} = 2,55$ м; $k_{дв}^{оп} = 0,245$; $b_{дв_0} = 0,8$ м для одинарних і $b_{дв_1} = 1,4$ м для подвійних пасажирських дверей; кількість дверей $n_{дв} = 1+2$ (відповідно, одинарних і подвійних); $S_{вод} = 3,55$ м²; $s_{сид} = 0,385$ м²; $k_{сид} = 3,3$; $\Delta m_{сп}^o = 860$ кг/м; $\Delta m_{сп}^o = 860$ кг/м; $k_p = 0,85-9$ і $\Delta w_m = 0,07510^{-3}$ кВт·год./кг·км, та попередньо розрахованих параметрах $\sum_{i=2}^n (n_{дв_i} s_{дв_i}) = 0,784$ м², $\sum_{i=1}^n S_i = 3,25$ м² (середнє значення при $L_{куз} = 10,0-12,0$ м), наведені у табл. 4.

Таблиця 4. Основні параметри проєктованих міських електробусів, розраховані за різними варіантами їх оптимізації

Варіант оптимізації (задані параметри)	$N_{пас}^H = 100$ чол.	$L_{пр} = 200$ км	$L_{куз} = 12,0$ м $L_{пр} = 200$ км
Довжина кузова, $L_{куз}$, м (18)/(23)	11,9	12,3	-
Розрахункова пасажиромістимість, чол.:	-	104	102
- за площею пасажирського салону, $N_{пас}^s$ (24)	(при $n_{сид}^{max} = 40$ сид.)		
- за допустимою повною масою, $N_{пас}^m$ (15)	-	78	82
Автономний середньодобовий пробіг, $L_{пр}$, км (19)	137	-	-
при допустимій масі тягових АКБ, $m_{акб}$, кг (20)	2391	-	-
при необхідній масі тягових АКБ, $m_{акб}$, кг (21)	-	3499	3499

Аналіз пасажировмістимості міських електробусів за різними варіантами оптимізації показує, що при заданому автономному пробігу довжина їх кузовів занадто велика, оскільки площа пасажирських салонів використовується не повністю. Очевидно, що мінімізація пасажировмістимості і довжини кузовів електробусів повинна здійснюватися на основі виконання двох наступних умов:

$$n_{\text{сид}}^{\min} < n_{\text{сид}} < n_{\text{сид}}^{\max}; \quad (26)$$

$$N_{\text{пас}}^s \approx N_{\text{пас}}^m, \quad (27)$$

тобто, розрахункова кількість одинарних пасажирських сидінь $n_{\text{сид}}$ повинна бути такою, при якій забезпечується умова (27).

При прийнятих значеннях вихідних параметрів проєктованих електробусів та заданому автономному пробігу $L_{\text{пр}} = 200$ км і необхідній для його досягнення масі тягових АКБ типу LiFePO_4 $m_{\text{акб}} = 3500$ кг для визначення пасажировмістимості за довжиною кузова $N_{\text{пас}}^s$ та допустимою повною масою $N_{\text{пас}}^m$ пропонуються наступні вирази:

$$N_{\text{пас}}^s \leq 20,4L_k - 2,1n_{\text{сид}}^i - 61, \quad (28)$$

$$N_{\text{пас}}^m \leq 12,6(18,5 - L_k). \quad (29)$$

З виразів (28 та (29) довжина кузова міського електробуса при прийнятій величині $n_{\text{сид}}^i$ становить:

$$L_k = 0,064n_{\text{сид}}^i + 8,91. \quad (30)$$

Кількість одинарних пасажирських сидінь $n_{\text{сид}}^i$, передбачених для встановлення у пасажирському салоні проєктованого електробуса, приймається на основі табл. 2 і табл. 3.

Результати оптимізації основних конструктивних та експлуатаційних параметрів перспективних міських електробусів при різній кількості пасажирських сидінь у їх салонах наведені у табл. 5.

Отже, за умови забезпечення максимальної пасажировмістимості довжина кузова проєктованого перспективного конкурентоспроможного міського електробуса у першому наближенні повинна становити 10,5 м.

Таблиця 5. Основні параметри перспективних міських електробусів

Кількість одинарних пасажирських сидінь, $n_{\text{сид}}^i$, сид.	25	30
Розрахункова довжина кузова, $L_{\text{куз}}$, м	10,5	10,8
Пасажировмістимість, чол.:		
- за площею кузова салону, $N_{\text{пас}}^s$	100	96
- за допустимою повною масою, $N_{\text{пас}}^m$	100	97

На етапі ескізного проєктування на основі вибраних моделей керованого та тягового мостів та компоувальної схеми за кількістю, типом і розміщенням пасажирських дверей довжина кузова електробуса повинна бути відкоректована, тобто, може незначно збільшуватися або зменшуватися.

Висновки

Результати проведених досліджень на основі запропонованої методики оптимізації номінальної пасажировмістимості та довжини кузовів перспективних електробусів показують, що за умови забезпечення середньодобового автономного пробігу 200 км:

- експлуатація міських електробусів типу ONC, створених на базі кузовів міських автобусів з довжиною кузова $12,0 \pm 0,2$ м, являється не доцільною, оскільки площа їх пасажирського салону занадто велика, тобто не оптимальна;

- габаритна довжина перспективних міських електробусів повинна становити 10,5-10,6 м, що забезпечує найбільшу номінальну пасажировмістимість 100 чол. як за площею пасажирського салону, так і за допустимою повною масою 19500 кг;

- збільшення кількості пасажирських сидінь повинно забезпечуватися застосуванням планувань пасажирських салонів з розміщенням одинарних стаціонарних та відкидних сидінь.

Запропонована методика на етапах розроблення ескізних пропозицій та ескізних проєктів забезпечує визначення основних конструктивних та експлуатаційних параметрів проєктованих міських електробусів типу ONC за трьома варіантами:

- стандартного типу (ONC-st) з тяговими АКБ необхідної енергопотужності та, відповідно, з максимальною масою, для досягнення заданого середньодобового автономного пробігу;

- типу ONC-V [11] із замінними блоками

тягових АКБ, енергопотужність та маса яких, наприклад, удвічі менші, за рахунок чого їх пасажиромістимість не зменшується, тобто залишається максимальною, при зменшенні допустимої повної маси до максимальної для двомостових автобусів, тролейбусів та вантажних автомобілів;

- типу ONC-T з розміщенням основного блоку тягових АКБ необхідної енергопотужності у причепі (допоміжний блок тягових АКБ невеликої енергопотужності та малої маси встановлюється у кузові електробуса).

Найбільш доцільним для проектування перспективних конкурентоспроможних міських електробусів довжиною 9,0-12,0 м з економічних міркувань та щільності забудови центральних частин вітчизняних міст та за умови зменшення допустимої повної маси до 18000 кг для подовження термінів експлуатації міських вулиць без проведення капітального ремонту їх покриття, являється варіант ONC-V.

Конфлікт інтересів

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

Література

1. Borén, S. (2019). Electric buses' sustainability effects, noise, energy use, and costs. 956-971. <https://doi.org/10.1080/15568318.2019.1666324>.
2. Lajunen, A., Kivekaes, K., Baldi, F., Vepsäläinen, J. & Tammi, K. (2018). Different Approaches to Improve Energy Consumption of Battery Electric Buses. IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference (VPPC). 1-6. <https://doi.org/10.1109/VPPC.2018.8605024>.
3. Hnatov A., Arhun, Shch., Ponikarovska, S. Energy saving technologies for urban bus transport. International Journal of Automotive and Mechanical Engineering. №14(4). 4649-4664. <https://doi.org/10.15282/ijame.14.4.2017.5.0366>.
4. Mohamed, M., Garnett, R. Ferguson, M. & Kanaroglou, P. (2016). Electric Buses: A Review of Alternative Powertrains. Renewable and Sustainable Energy Reviews. 62. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.05.019>.
5. Houbbadi, A., Trigui, R., Pelissier, S., Redondo-Iglesias, E. & Bouton, T. (2019). Optimal Scheduling to Manage an Electric Bus Fleet Overnight Charging. Energies. <https://doi.org/10.3390/en12142727>.
6. Houbbadi, A., Trigui R., Pelissier S., Bouton T. & Eduardo R.-I. (2017). Multi-Objective Optimisation of the Management of Electric Bus Fleet Charging. <https://doi.org/10.1109/VPPC.2017.8331015>.
7. Wang, J., Kang, L. & Yongzhong, L. (2020). Optimal scheduling for electric bus fleets based on dynamic programming approach by considering battery capacity fade. Renewable and Sustainable Energy Reviews. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.109978>.
8. Torabi, S., Bellone M. & Wahde M. (2020). Energy minimization for an electric bus using a genetic algorithm. <https://doi.org/10.1186/s12544-019-0393-1>.
9. Hatem, A. & Moataz M. (2021). A Prediction Model for Battery Electric Bus Energy Consumption in Transit. Energies, 14(10), 2824. <https://doi.org/10.3390/en14102824>.
10. Kivekäs, K., Lajunen, A., Baldi, F., Vepsäläinen, J. & Tammi, K. (2019). Reducing the Energy Consumption of Electric Buses With Design Choices and Predictive Driving. IEEE Transactions on Vehicular Technology. 11409-11419. <https://doi.org/10.1109/TVT.2019.2936772>.
11. Єдині технічні приписи щодо офіційного затвердження транспортних засобів категорій М2 та М3 стосовно їхньої загальної конструкції : Правила ЕЭК ООН № 107-02. [Чинний з 01.07.2009]. ООН, 2011. Yedyni tekhnichni pryypusy shchodo ofitsiinoho zatverdzhennia transportnykh zasobiv katehorii M2 ta M3 stosovno yikhnoi zahalnoi konstruktssii [Uniform provisions concerning the approval of category M2 and M3 vehicles with regard to their general construction]. (2011). Regulation No. 107-02 from 1st July 2009. Kyiv: Derzhstandart Ukrainy [in Ukrainian].
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, 13–24. Voitkiv S. V. (2019). Napriamky stvorennia konkurentospromozhnykh miskykh elektrobususiv velykoho klasu. Zbirnyk naukovykh materialiv mizhnarodnoi naukovo-praktychnoi internet-konferentsii "Innovatsiini tekhnolohii rozvytku ta efektyvnosti funktsionuvannia avtomobilnoho transportu". [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"]. 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 method of optimizing the main technical parameters of the promising city electric buses of ONC Type

Abstract. Problem. City electric buses of the ONC type, which are widely used for passenger transportation on city routes, even if the permissible gross weight is increased by 1500 kg, have significantly lower passenger capacity than the high-class buses on the basis of the bodies of which they are created. This is due to the fact that the mass of traction batteries is much greater than the mass of the power unit with all its city bus systems. **Goal.** The goal is determining the optimal values of the main technical parameters of promising electric buses already at the stages of development of sketch proposals or sketch projects. **Methodology.** The work is based on the analysis of technical parameters of city electric buses of modern designs and regulated technical requirements for high-capacity passenger wheeled vehicles, the dependences of their passenger capacity on the dimensional parameters of the body, the weight of the equipped electric bus without the weight of traction batteries and the autonomous mileage of electric buses. **Results.** Three variants of a technique of optimizing the parameters of the designed city electric buses on one of the set

parameters – the nominal passenger capacity, average daily autonomous run or length of a body of an electric bus are developed. **Originality.** An algorithm for determining the optimized parameters of the designed electric buses at the stage of development of sketch proposals and sketch projects is proposed. **Practical value.** The proposed method provides the design of promising competitive city electric buses of ONC type, which are most suitable for use in the cities of Ukraine, with a given or maximum possible nominal passenger capacity in terms of providing a given or maximum autonomous mileage and equality of passenger capacity, determined by passenger area mass.

Key words: first class electric bus; city electric bus; passenger capacity of the electric bus; parameters of electric bus masses; parameter optimization; autonomous mileage.

Voytkiv Staniskav¹, Cand. of Science, General Designer, e-mail: 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.