

Будниченко І.В., Харламов С.А.
Національний транспортний університет, м. Київ, Україна

МЕТОДИКА ОЦІНКИ СПОЖИВАННЯ ЕНЕРГІЇ ЕЛЕКТРОБУСОМ ТА ПАРАМЕТРІВ ТЯГОВОЇ АКУМУЛЯТОРНОЇ БАТАРЕЇ В УМОВАХ ЕКСПЛУАТАЦІЇ

У статті пропонується методика визначення реальної питомої витрати електроенергії при експлуатації електробуса та обґрунтування ємності тягової акумуляторної батареї (ТАБ) для забезпечення терміну її використання з заданою ймовірністю для роботи на маршруті відомої довжини.

У статті зазначається актуальність запропонованої методики особливо в наш час, коли необхідно економне використання енергоресурсів.

Важливо, що на основі проведеного аналізу відомих публікацій авторами звертається увага на питання оптимізації параметрів електробусів, тягових акумуляторних батарей, інфраструктури та умов їх використання для зменшення експлуатаційних витрат електричних транспортних засобів.

Метою даного дослідження є визначення реальних витрат електроенергії та необхідної ємності тягової акумуляторної батареї для електробуса, а також запланований термін роботи тягової акумуляторної батареї.

З точки зору обґрунтування авторами конструктивної енергоємності ТАБ електробуса для заданих умов експлуатації дослідження було визначено витрати електричної енергії під час його руху маршрутом.

У результаті дослідження авторами встановлено реальні витрати електроенергії та необхідної ємності тягової акумуляторної батареї для електробуса.

Очевидно, що отриманий результат забезпечить з ймовірністю не менше 95% рух на маршруті на протязі доби та запланований термін роботи тягової акумуляторної батареї.

Зазначено, що була отримана вибірка даних про пробіг та витрати електроенергії за добу на підставі результатів спостереження, за якими були обчислені питомі витрати електроенергії в (кВт·год)/км.

Акцентовано увагу на важливість виконання умов, що обґрунтовують енергетичну ємність ТАБ.

Показано, що ємність ТАБ має бути достатньою для компенсації витрат енергії на рух, сталих витрат електроенергії на живлення допоміжних кіл (системи опалення, кондиціонування тощо) та враховувати з ймовірністю 0,95 або 0,99 потрібну додаткову ємність, яка забезпечить не перевищення гранично допустимого розряду ТАБ, встановленого її виробником.

У майбутньому подальше дослідження має бути спрямовано на визначення конкретних значень ємності ТАБ для інших моделей електробусів.

Методика може бути використана для визначення реальних значень питомих витрат електроенергії та ємності ТАБ для довільних моделей електробусів.

Ключові слова: електроенергія, питомі витрати, тягова акумуляторна батарея, ємність, ймовірність безвідмовної роботи, електробус.

ВСТУП

Проблеми енергозбереження у світі потребують мобілізації усіх зусиль в різних напрямках, зокрема, політичному, законодавчому, науковому, економічному, технічному, технологічному, господарчому та інших. Енергозбереження регулюється у країнах світу на державному рівні, оскільки є питанням національної безпеки.

Особливо в наш час вирішення проблеми енергозбереження є важливим для України, як енергозалежної держави.

За інформацією із загальнодоступних джерел Україна забезпечена своїми паливно-енергетичними ресурсами до 47 %, решта 53 % покриваються за рахунок імпорту.

В структурі витрат близько 35 % споживає промисловість, 20 % - житлово-комунальне господарство, а 9 % - транспорт. Це свідчить про високу актуальність вирішення питань енергозбереження. Запропонована методика оцінки споживання енергії електробусом та параметрів тягової акумуляторної батареї в умовах експлуатації особливо актуальна в наш час, коли необхідно економне використання енергоресурсів.

АНАЛІЗ ЛІТЕРАТУРНИХ ДАНИХ ТА ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМИ

Аналіз відомих нам публікацій показав, що питанню оптимізації параметрів електробусів, тягових акумуляторних батарей, інфраструктури та умов їх використання з метою зменшення експлуатаційних витрат та покращення якості експлуатації присвячено багато робіт.

Так, у роботі [1] вирішується задача гармонізації роботи транспортної мережі міста при запровадженні використання електробусів як таких, що мають певні особливості експлуатації.

Запропоновані пропозиції для створення єдиної моделі організації перевезень. Цільовою функцією оптимізації системи перевезень має бути мінімізація капітальних вкладень в парк електротранспорту та загальних витрат та функціонування всієї транспортної мережі.

У роботі [2] наведено детальний огляд трьох категорій електричних автобусів: гібридних, на паливних елементах та акумуляторах. Розглядалися економічні, експлуатаційні, енергетичні та екологічні характеристики кожної технології на основі імітаційних моделей. Показано, що автобус з ТАБ є найбільш підходящою альтернативою, враховуючи очікувані поліпшення технології акумуляторів і тенденцію до використання стійких джерел у виробленні електроенергії.

У роботі [3] розроблена модель для оптимізації графіків підзарядки електричних автобусів, яка визначає як планові, так і операційні рішення, які мінімізують загальні річні витрати. Використання моделі дозволяє надати рекомендації щодо використання електричних автобусів та розробки системи швидкої зарядки. Виконаний порівняльний аналіз показав, що використовувати електричні автобуси більш економічно і екологічно, ніж дизельні автобуси.

Розрахункові та експериментальні дослідження, виконані у Харкові [4] показали, що мікроавтобус, переобладнаний в електробус найкраще підходить для використання у місті. В якості джерела енергії використовувався ультраконденсатор.

В дослідженнях [5,6] представлено методичний підхід, який може бути застосований для визначення стратегії зарядки парку електричних автобусів у міських автобусних перевезеннях. Цей метод використовує еволюційні алгоритми з багатоцільовою оптимізацією з метою зниження витрат на електроенергію та старіння батареї з урахуванням технічних обмежень (наприклад, піковий попит на навантаження, технологія зарядки). Такий підхід визначає оптимальну стратегію зарядки, яка мінімізує вартість старіння батареї (витрати на заміну батареї, розподілені на термін служби батареї).

В роботах [7,8] оцінюються ключові фактори, що впливають на енергоспоживання електробусів. Була розроблена імітаційна модель універсального електричного автобуса. Згідно з результатами моделювання, високий рівень допоміжної потужності (холодні і спекотні кліматичні умови) значно збільшує енергоспоживання. Також було відзначено, що існує сильна лінійна кореляція між агресивністю водіння та споживанням енергії. Оцінюється зниження енергоспоживання використанням алюмінієвого шасі, кузова з низькою підлогою, шин низького опору, теплового насоса та прогностичного водіння.

Робота [9] присвячена вивченню соціальних витрат, загальної вартості володіння, використання енергії, шуму під час прискорення. Було встановлено, що значна економія соціальних витрат і загальна вартість володіння в порівнянні з дизельними і біогазовими автобусами, досягається головним чином через зниження шуму, відсутність викидів при експлуатації і зменшення використання енергії. Показано, що навантаження на електробус, топографія маршруту, температура на відкритому повітрі, кількість стартів/зупинок та поведінка водія мають великий вплив на витрати енергії для електричних автобусів. Проведені заміри використання енергії на рух, обігрів або кондиціювання салону.

Також досліджувались [10] можливості збільшення терміну служби батареї при експлуатації електробусів за рахунок як внутрішнього контролю електроспоживання на борту, так і врахуванням зовнішніх факторів. У даній роботі був запропонований оптимальний метод планування на основі динамічного програмування для мінімізації витрат на заміну батареї протягом усього терміну служби автопарків електробусів. Запропонований метод зменшує інвестиції на заміну батареї на 20% для всієї системи парку електричних автобусів.

У дослідженні [11] розглядається мінімізація споживання енергії електричним мікроавтобусом, що працює в міському середовищі. Показано, що можна зменшити енергоспоживання приблизно на 7-12% за умови якщо транспортний засіб підтримує постійну швидкість між зупинками, з короткими фазами прискорення і уповільнення з використанням оптимізованого профіля швидкості, що генерується за допомогою генетичного алгоритму.

У [12] вивчався вплив конструктивних характеристик акумуляторно-електричних автобусів, а також операційних, топологічних і зовнішніх параметрів на споживання енергії при перевезеннях в міських умовах. Результати показали значний вплив класу та стану дороги, початкового заряду, завантаження пасажирів, агресивності водіння, середньої швидкості та щільності зупинок на маршруті на споживання енергії електробусом.

Визначенню оптимальної ємності ТАБ для тролейбуса з частковим автономним ходом за умов підзарядки від мережі під час руху на маршруті присвячені роботи [13, 14].

Але дослідження, спрямовані на визначення споживання електроенергії та параметрів тягової ТАБ електробусів, які забезпечують запланований термін її використання з наперед заданою ймовірністю для конкретних умов експлуатації нам невідомі.

У містах світу все більше розповсюдження для перевезення пасажирів отримує електричний транспорт, який приходить на заміну автобусів з дизельними та газовими двигунами. При цьому збільшується використання електробусів. Така еволюція міського транспорту викликана зниженням запасів та збільшенням вартості викопного палива та погіршенням екологічного стану міст, особливо мегаполісів. У зв'язку з цим важливими завданнями у цій сфері є визначення ефективності такої заміни з точки зору її впливу на екологію та вартість придбання, володіння і використання електричних транспортних засобів на протязі їх життєвого циклу. Важливим елементом електробусів є джерело енергії – тягова акумуляторна батарея (ТАБ). Перед виробниками постає задача оптимізації конструкції електробусів, важливою складовою якої є визначення оптимальних параметрів ТАБ для конкретних умов експлуатації такого транспортного засобу. Тому вирішенню цих задач присвячено багато досліджень.

МЕТА І ЗАВДАННЯ ДОСЛІДЖЕННЯ

Метою даного дослідження є визначення реальних витрат електроенергії та необхідної ємності тягової акумуляторної батареї для електробуса, яка забезпечить з ймовірністю не менше 95% рух на маршруті на протязі доби, та запланований термін роботи тягової акумуляторної батареї.

РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕННЯ

Обґрунтування конструктивної енергоемності ТАБ електробуса для заданих умов експлуатації потребує визначення витрати електричної енергії під час його руху маршрутом. Значення цього показника можна отримати виконав спостереження за витратами енергії тролейбуса такої ж самої моделі, яка буде використана для виготовлення електробуса. Такий підхід оснований на тому, що у даному випадку тролейбус та електробус мають однакову тягову електричну установку та кузов. На підставі вищезазначеного вимірювання витрат енергії виконувалися на тролейбусах типу PTS-12 (див.рис.1), які перебувають в експлуатації в м. Харків та мають характеристики, які впливають на витрати електроенергії, що подані у таблиці 1.



Рисунок 1 – Загальний вид тролейбуса типу PTS-12, що перебуває в експлуатації в м. Харків

Таблиця 1- Технічні характеристики тролейбусів

Параметр, характеристика	Значення показника
Маса у спорядженому стані, кг	12700
Технічно припустима максимальна маса, кг	19 000
Максимальна швидкість з технічно припустимою максимальною масою, км/год	65
Тип двигуна	Асинхронний
Потужність, кВт	180 т
Система керування	Імпульсний частотний тяговий інвертор на IGBT транзисторах типу СТТ-01
Сумарна потужність системи опалення відділення водія та салону	20 кВт
Сумарна потужність кондиціонеру відділення водія	28,5* кВт
Примітка «*» фактично задіюється 50%	

Витрати електроенергії визначалися за показами віртуального лічильника енергії, що входить до складу монітора пульта водія (див.рис.2).



Рисунок 2 – Монітор з віртуальним лічильником витрати електроенергії за добу

За результатами спостереження отримана вибірка даних про пробіг та витрати електроенергії за добу, за якими обчислені питомі витрати електроенергії в (кВт*год) /км.

Результати спостережень та розрахунку подані у таблиці 2. Досліджувалась робота 50 тролейбусів типу PTS-12 на різних маршрутах м.Харків. Така сукупність маршрутів є типовою для умов експлуатації у м.Харків.

Таблиця 2 – Питомі витрати електроенергії тролейбусом типу PTS-12

Номер реєстрації	Добова витрата електричної енергії, кВт*год	Добовий пробіг, км	Питома витрата електроенергії, (кВт*год)/км	Номер реєстрації	Добова витрата електричної енергії, кВт*год	Добовий пробіг, км	Питома витрата електроенергії, (кВт*год)/км
1	103	90	1,144	31	301	261	1,153
2	425	290	1,466	32	149	139	1,072
3	357	249	1,434	33	277	202	1,371
4	220	153	1,438	34	576	484	1,19
5	118	83	1,422	35	138	126	1,095
6	420	263	1,597	36	277	212	1,307
7	39	27	1,444	37	276	235	1,174
8	138	114	1,211	38	271	200	1,355
9	254	190	1,337	39	286	250	1,144
10	236	184	1,283	40	262,7	182	1,443
11	134	124	1,081	41	139	124,5	1,116
12	252,7	178	1,42	42	417	359,4	1,16
13	341	420	0,812	43	101,7	89	1,143
14	130	121	1,074	44	119	107	1,112
15	101	89	1,135	45	249	182	1,368

16	289	262	1,103	46	190	140	1,357
17	286	262	1,092	47	243	170	1,429
18	426	433	0,984	48	156	143	1,091
19	142	120	1,183	49	345	279	1,237
20	191	155	1,232	50	204	160	1,275
21	262	318	0,824	51	161,6	124,2	1,301
22	91	74	1,23	52	320	308	1,039
23	990	690	1,435	53	276	200	1,38
24	290	195	1,487	54	264	278	0,95
25	264	187	1,412	55	530	262	2,023
26	89	64	1,391	56	464	406	1,143
27	284	197	1,442	57	258	183	1,41
28	163	147	1,109	58	194	168	1,155
29	131	118	1,11	59	186	135	1,378
30	207	124	1,669	60	168	136	1,235

Статистичні характеристики вибірки питомих витрат електроенергії транспортного засобу подані у таблиці 3.

Таблиця 3 – Статистичні характеристики вибірки питомих витрат електроенергії

Характеристика та її позначення	Питомі витрати енергії за добу, кВт*год/км
Дисперсія, s^2	0,0409
Стандартне відхилення, s	0,2121
Середнє значення	1,26

Перевірка показала, що значення вибірки питомих витрат енергії відповідають нормальному закону розподілу.

Обґрунтування енергетичної ємності ТАБ має будуватися на виконанні наступних умов. Оскільки витрата електроенергії транспортним засобом, що живиться від ТАБ має мінливий характер то :

-максимальна витрати витрата електроенергії має бути в межах робочого діапазону ТАБ, що забезпечує її ресурс встановлений виробником ТАБ з одного боку, як мінімум з ймовірністю 0,95

-з іншого боку випадки, коли максимальна витрата робочого діапазону перевищує робочий діапазон ТАБ, то з ймовірністю 0,99 вона не повинна бути більшою ніж гранично допустимий розряд ТАБ, який також визначений її виробником.

Тоді ці умови можуть бути записані так:

$$C = \max \begin{cases} C_p = L \cdot X_{0,95}^{\max} + \beta = k_2 C \\ C_d = L \cdot X_{0,99}^{\max} + \beta = k_1 C \end{cases} \quad (1)$$

Де C_p – робочий діапазон розряду ТАБ, кВт*год за яким зберігається її ресурс.

C_d – допустимий діапазон розряду ТАБ кВт*год за яким забезпечується її працездатний стан, вихід за який призводить до відмови ТАБ чи переривання кола живлення від неї;

$X_{0,95}^{\max}$ та $X_{0,99}^{\max}$ – границі одностороннього довірчого інтервалу для питомих витрат електроенергії в (кВт*год) / км, який обчислюється згідно з ДСТУ ISO 2602 для довірчої рівня 0,95 та 0,99;

L – пробіг транспортного засобу за час роботи на маршруті, коли він живиться від ТАБ, км.

k_1 – відношення граничного діапазону енергетичної ємності ТАБ до її конструктивної енергетичної ємності;

k_2 – відношення робочого діапазону енергетичної ємності ТАБ до її конструктивної енергетичної ємності;

C – конструктивна енергетична ємність ТАБ, кВт*год;

β – сталі питомі витрати електроенергії на живлення допоміжних кіл (опалювачів салону та відділення водія, а також кондиціонерів, кВт*год/км.

Границі одnobічного довірчого інтервалу для питомих витрат електроенергії визначають згідно з ДСТУ ISO 2602 , а саме:

$$X_{0,95}^{MAX} < \bar{x} + t_{0,95} \cdot s \text{ для довірчого рівня } 0,95 \quad (2)$$

та

$$X_{0,99}^{MAX} < \bar{x} + t_{0,99} \cdot s \text{ для довірчого рівня } 0,99. \quad (3)$$

$t_{0,95}, t_{0,99}$ це величини розподілу Стьюдента з $v=n-1$ ступенями вільності , значення яких подані у таблиці 1 ДСТУ ISO 2602.

Сталі питомі витрати електроенергії (β) –на живлення допоміжних кіл (опалювачів салону та відділення водія, а також кондиціонерів), в кВт*год/км, можуть бути визначені так.

$$\beta = \frac{N \cdot T}{L} \quad (4)$$

або

$$\beta = \frac{N}{V_{сп}} \quad (5)$$

де T - час роботи, в год., системи опалення чи системи кондиціонування під час руху транспортного засобу маршрутом, коли споживається енергія ТАБ.

$V_{сп}$ - швидкість сполучення на маршруті, км/год.

N – потужність системи опалення чи системи кондиціонування транспортного засобу.

Згідно технічних характеристик транспортного засобу , що подані у таблиці 1, система кондиціонування має потужність більшу ніж система опалення але вона працює періодично під час руху транспортного засобу маршрутом , тому в середньому використовує 50% своєї потужності, а значить її середня потужність буде не 28 кВт а 14 кВт і поступається потужності системи опалення яка, як правило, в холодний період року часу задіяна на повну потужність протягом часу роботи транспортного засобу на маршруті. Тобто значення β має обчислюватися для потужності системи опалення транспортного засобу

Оскільки пробіг транспортного засобу за час роботи а маршруті протягом доби має бути визначений змовником транспортного засобу , то вираз 1 краще записати так:

$$C_y = \max \begin{cases} C_y = \frac{X_{0,95}^{MAX} + \frac{N}{V_{сп}}}{k_2} \\ C_y = \frac{X_{0,99}^{MAX} + \frac{N}{V_{сп}}}{k_1} \end{cases} \dots\dots\dots(6)$$

Де $C_y = C/L$ – питома конструктивна енергетична ємність ТАБ, (кВт*год)/км.

Для отриманої вибірки даних про питомі витрати енергії значення $X_{0,95}^{MAX}$ та $X_{0,99}^{MAX}$ будуть такими:

$$X_{0,95}^{MAX} = 1,26 + 1,673 \cdot 0,2121 = 1,6148, \text{ (кВт*год)/км}$$

$$X_{0,99}^{MAX} = 1,26 + 2,393 \cdot 0,2121 = 1,7676, \text{ (кВт*год)/км}$$

Для сталих питомих витрат електроенергії (β) на живлення системи опалення потужністю 20 кВт та швидкістю сполучення 15 км/год значення β буде дорівнюватися

$$\beta = \frac{10}{15} = 0,6667 \text{ кВт*год/км}$$

Відношення робочого діапазону енергетичної ємності ТАБ до її конструктивної ємності , як правило, для групи літій іонних ТАБ дорівнюється $k_2 = 0,6$.

Відношення граничного діапазону енергетичної ємності ТАБ до її конструктивної енергетичної ємності, як правило, для групи літій іонних ТАБ дорівнюється $k_1 = 0,7$.

Тоді вираз 6 буде мати такий вид:

$$C_y = \max \begin{cases} C_y = \frac{1,6148 + 0,6667}{0,6} = 3,4776 \text{ (кВт * год)/км} \\ C_y = \frac{1,7676 + 0,6666}{0,7} = 3,797 \text{ (кВт * год)/км} \end{cases} \quad (7)$$

На підставі результату обчислення (7) питома конструктивна ємність ТАБ для електробуса на базі тролейбуса PTS-12 має бути прийнята 3,797 кВт*год/км, що з ймовірністю 0,99 забезпечить безвідмовну роботу ТАБ.

В результаті для заданої довжини маршруту L може бути підрахована необхідна ємність ТАБ C

$$C = C_y \cdot L$$

яка забезпечує безвідмовну експлуатацію ТАБ з ймовірністю 0,99.

ОБГОВОРЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ДОСЛІДЖЕННЯ

В цілому дослідження дають загальне уявлення про показники витрат енергії, але в реальних умовах експлуатації електричного транспортного засобу, особливо, коли є ряд зовнішніх факторів, таких як умови руху, кваліфікація водія, рух інтенсивність, погодні умови тощо, значення споживаної енергії може сильно змінюватися.

Сучасні електробуси та тролейбуси обладнані спеціальними приладами, які контролюють витрати електричної енергії під час руху та надають інформацію про кількість витраченої енергії під час роботи транспортного засобу на маршруті.

З точки зору обґрунтування авторами конструктивної енергоємності ТАБ електробуса для заданих умов експлуатації дослідження потребувало визначити витрати електричної енергії під час його руху маршрутом.

Об'єктом дослідження, що стосувалося наукового обґрунтування, був транспортний засіб типу PTS-12, а у даному випадку тролейбус та електробус мають однакову тягову електричну установку та кузов. Це факт був покладений в основу проведеного дослідження.

Отже, дослідження щодо вимірювання витрат енергії виконувалися авторами на тролейбусах типу PTS-12, які перебувають безпосередньо в експлуатації в м. Харків та мають характеристики, які впливають на витрати електроенергії. Для отримання значення цього показника було здійснено спостереження за витратами енергії тролейбуса такої ж самої моделі, яка буде використана для виготовлення електробуса.

Отримані авторами результати дослідження показали, що ємність ТАБ має бути достатньою для компенсації витрат енергії на рух, сталих витрат електроенергії на живлення допоміжних кіл (системи опалення, кондиціонування тощо) та враховує з ймовірністю 0,95 або 0,99 потрібну додаткову ємність, яка забезпечить не перевищення гранично допустимого розряду ТАБ, визначеного її виробником.

Методика може бути використана для визначення реальних значень питомих витрат електроенергії та ємності ТАБ для довільних моделей електробусів.

ВИСНОВКИ

У статті вирішено актуальну науково-технічну задачу стосовно методики оцінки споживання енергії електробусом та параметрів тягової акумуляторної батареї в умовах експлуатації.

У результаті виконання роботи отримано такі основні результати:

1. Встановлено визначення реальних витрат електроенергії та необхідної ємності тягової акумуляторної батареї для електробуса, яка забезпечить з ймовірністю не менше 95% рух на маршруті на протязі доби та запланований термін роботи тягової акумуляторної батареї.

2. За результатами спостереження була отримана вибірка даних про пробіг та витрати електроенергії за добу, за якими були обчислені питомі витрати електроенергії в (кВт·год) /км. Перевірка показала, що значення вибірки питомих витрат енергії відповідають нормальному закону розподілу

3. Оскільки витрата електроенергії транспортним засобом, що живиться від ТАБ має мінливий характер то обґрунтування енергетичної ємності ТАБ має будуватися на виконанні наступних умов:

-максимальна витрата електроенергії має бути в межах робочого діапазону ТАБ, що забезпечує її ресурс встановлений виробником ТАБ з одного боку, як мінімум з ймовірністю 0,95

-з іншого боку випадки, коли максимальна витрата робочого діапазону перевищує робочий діапазон ТАБ, то з ймовірністю 0,99 вона не повинна бути більшою ніж гранично допустимий розряд ТАБ, який також визначений її виробником.

В результаті дослідження запропонована методика визначення реальної питомої витрати електроенергії при експлуатації електробуса, та обґрунтування ємності тягової акумуляторної батареї для забезпечення терміну її використання з заданою ймовірністю для роботи на маршруті відомої довжини.

У майбутньому подальше дослідження має бути спрямовано на визначення конкретних значень ємності ТАБ для інших моделей електробусів.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. CHEN Xiaohongb. Optimizing Battery Electric Bus Transit Vehicle Scheduling with Battery Exchanging: Model and Case Study ZHU Chaoa. 13th COTA International Conference of Transportation Professionals (ICTP 2013). <https://doi.org/10.1016/j.sbspro.2013.08.306>

2. 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>

3. YushengWang^{ab}YongxiHuang^{b1}JiupingXu^aNicoleBarclay^c Optimal recharging scheduling for urban electric buses: A case study in Davisio [Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review Volume 100](#), April 2017, Pages 115-132 <https://doi.org/10.1016/j.tre.2017.01.001>
- 4.Hnatov A., Arhun, Shch., Ponikarovska, S. Energy saving technologies for urban bus transport.International Journal of Automotive and Mechanical Engineering. No14(4). 4649-4664. <https://doi.org/10.15282/ijame.14.4.2017.5.0366>
- 5.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>
- 6.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>
- 7.Lajunen, A., Kivekaes, K., Baldi, F., Vepsae-laeinen, 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>
- 8.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 Tran-sactions on Vehicular Technology. 11409-11419. <https://doi.org/10.1109/TVT.2019.2936772>
- 9.Borén, S. Electric buses' sustainability effects, noise, energy use, and costs. 956-971. (2019). <https://doi.org/10.1080/15568318.2019.1666324>
- 10.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>
- 11.Torabi, S., BelloneM. & WahdeM. (2020). Energy minimization for an electric bus using a genetic algorithm. <https://doi.org/10.1186/s12544-019-0393-1>
- 12.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> .
- 13.Андрусенко С.І. Математична модель енергетичної ємності тягової акумуляторної батареї / С.І. Андрусенко, В.Б. Будниченко, В.С. Подпіснєв // Вісник Національного транспортного університету. Серія «Технічні науки». Науково-технічний збірник. – К.: НТУ, 2021. – Вип. 3 (50)). – С. 3–10.– (doi.org/10.33744/2308-6645-2021-3-50-003-010)–Режимдоступу: <http://publications.ntu.edu.ua/visnyk/50/003-010.pdf>
- 14.Андрусенко С.І. Оптимізація параметрів тягової акумуляторної батареї у тролейбусах із частковим автономним ходом / С.І. Андрусенко, В.Б. Будниченко, В.С. Подпіснєв // Науково-виробничий журнал «Автошляховик України» (Автомобільний транспорт). – 2021. – № 3 (267)2021. – С. 15–21. – (doi.org/10.33868/0365-8392-2021-3-267-15-21) .

REFERENCES

- 1.CHEN Xiaohongb. Optimizing Battery Electric Bus Transit Vehicle Scheduling with Battery Exchanging: Model and Case Study ZHU Chaoa. 13th COTA International Conference of Transportation Professionals (CICTP 2013). <https://doi.org/10.1016/j.sbspro.2013.08.306>
- 2.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>
3. YushengWang^{ab}YongxiHuang^{b1}JiupingXu^aNicoleBarclay^c Optimal recharging scheduling for urban electric buses: A case study in Davisio [Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review Volume 100](#), April 2017, Pages 115-132 <https://doi.org/10.1016/j.tre.2017.01.001>
- 4.Hnatov A., Arhun, Shch., Ponikarovska, S. Energy saving technologies for urban bus transport.International Journal of Automotive and Mechanical Engineering. No14(4). 4649-4664. <https://doi.org/10.15282/ijame.14.4.2017.5.0366>
- 5.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>
- 6.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>
- 7.Lajunen, A., Kivekaes, K., Baldi, F., Vepsae-laeinen, 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>
- 8.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 Tran-sactions on Vehicular Technology. 11409-11419. <https://doi.org/10.1109/TVT.2019.2936772>
- 9.Borén, S. Electric buses' sustainability effects, noise, energy use, and costs. 956-971. (2019). <https://doi.org/10.1080/15568318.2019.1666324>

10. 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>

11. 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>

12. 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> .

13. Andrusenko S.I. Mathematical model of the energy capacity of the traction battery / S.I. Andrusenko, V.B. Budnychenko, V.S. Podpisnov // *Bulletin of the National Transport University. Series "Technical Sciences"*. Scientific and technical collection. - K.: NTU, 2021. - Issue 3 (50) . – P. 3–10. – (doi.org/10.33744/2308-6645-2021-3-50-003-010) – Access mode: <http://publications.ntu.edu.ua/visnyk/50/003-010.pdf>

14. Andrusenko S.I. Optimization of traction battery parameters in trolleybuses with partial autonomous operation / S.I. Andrusenko, V.B. Budnychenko, V.S. Podpisnov // *Research and production journal "Automobile of Ukraine" (Automotive transport)*. – 2021. – No. 3 (267)'2021. – pp. 15–21. – (doi.org/10.33868/0365-8392-2021-3-267-15-21).

Budnychenko I.V., Kharlamov S.A. Method of assessment of energy consumption by electric bus and parameters of traction accumulatory battery under operational conditions

The article proposes a method for determining the real specific consumption of electricity during the operation of an electric bus, and substantiating the capacity of a traction battery (TAB) to ensure the term of its use with a given probability for work on a route of a known length.

The article notes the relevance of the proposed methodology, especially in our time, when economical use of energy resources is necessary.

It is important that, based on the analysis of well-known publications, the authors pay attention to the issue of optimizing the parameters of electric buses, traction batteries, infrastructure and conditions of their use in order to reduce the operating costs of electric vehicles.

The purpose of this study is to determine the real electricity consumption and the required capacity of the traction battery for an electric bus, as well as the planned period of operation of the traction battery.

From the point of view of substantiation by the authors of the constructive energy capacity of the TAB electric bus for the specified operating conditions, the study determined the consumption of electrical energy during its movement along the route.

As a result of the research, the authors determined the real consumption of electricity and the required capacity of the traction battery for the electric bus.

It is obvious that the obtained result will ensure with a probability of at least 95% the movement on the route during the day and the planned period of operation of the traction battery.

It is shown that the capacity of the TAB should be sufficient to compensate for energy costs for movement, constant electricity costs for powering auxiliary circuits (heating systems, air conditioning, etc.) and take into account with a probability of 0.95 or 0.99 the required additional capacity, which will ensure that the maximum permissible TAB grade set by its manufacturer.

In the future, further research should be aimed at determining specific values of TAB capacity for other models of electric buses.

The method can be used to determine the real values of specific electricity consumption and TAB capacity for arbitrary models of electric buses.

Key words: electricity, specific costs, traction battery, capacity, probability of failure-free operation, electric bus.

БУДНИЧЕНКО І.В., Національний транспортний університет, Київ, Україна, repair2006@ukr.net, orcid.org/0000-0003-3073-4913

ХАРЛАМОВ С.А., аспірант, Національний транспортний університет, Київ, Україна, stanyслав.kharlamov@gmail.com, <http://orcid.org/0009-0005-2358-850X>

Igor BUDNYCHENKO, National Transport University, repair2006@ukr.net, orcid.org/0000-0003-3073-4913

Stanyслав KHARLAMOV, postgraduate, National Transport University, e-mail: stanyслав.kharlamov@gmail.com, <http://orcid.org/0009-0005-2358-850X>

DOI 10.36910/automash.v1i22.1350