

АВТОМОБІЛЬНИЙ ТРАНСПОРТ

УДК 629.3.016.8:621.355:629.017

DOI <https://doi.org/10.35546/kntu2078-4481.2026.3.11>**С. І. АНДРУСЕНКО**

кандидат технічних наук, професор,
завідувач кафедри технічної експлуатації автомобілів та автосервісу
Національний транспортний університет
ORCID: 0000-0002-9914-0200

В. Б. БУДНИЧЕНКО

кандидат технічних наук, доцент,
доцент кафедри технічної експлуатації автомобілів та автосервісу
Національний транспортний університет
ORCID: 0000-0002-1235-3781

В. С. ПОДПІСНОВ

старший викладач кафедри технічної експлуатації автомобілів та автосервісу
Національний транспортний університет
ORCID: 0000-0002-8583-1502

**МЕТОД ОБҐРУНТУВАННЯ ЕНЕРГЕТИЧНОЇ ЄМНОСТІ ТЯГОВОЇ
АКУМУЛЯТОРНОЇ БАТАРЕЇ ДЛЯ ВІДОМИХ УМОВ РУХУ МАРШРУТОМ**

Стаття належить до галузі автотранспортної інженерії та присвячена актуальній проблемі розвитку міського електричного транспорту, зокрема тролейбусів з автономним ходом. У роботі розглядається питання обґрунтування енергетичної ємності тягової акумуляторної батареї, необхідної для забезпечення руху тролейбуса з автономним ходом на ділянках маршруту без контактної мережі. Актуальність дослідження зумовлена переходом до екологічно чистого транспорту та необхідністю заміни традиційних автобусів електричними аналогами.

На підставі аналізу існуючих підходів до визначення ємності батарей, що переважно базуються на усереднених статистичних даних та не враховують реальні умови конкретного маршруту, запропоновано новий метод, який дозволяє врахувати ключові експлуатаційні фактори: довжину ділянки автономного ходу, кількість зупинок, швидкість руху, ухили дороги та рівень завантаження тролейбуса пасажирями.

Метод базується на математичному моделюванні витрат енергії під час руху, де враховано енергію на розгін машини, подолання опору руху, забезпечення роботи допоміжних систем і комфорту пасажирів, а також втрати та часткове відновлення енергії завдяки рекуперації. Це дозволяє більш точно оцінити загальне енергоспоживання на маршруті та визначити необхідну ємність акумуляторної батареї.

Отримані результати мають як теоретичне, так і практичне значення. Метод може бути застосований експлуатаційними підприємствами під час розроблення тендерної документації на придбання нових тролейбусів з функцією автономного ходу. Метод також може бути застосований підприємствами – виробниками тролейбусів під час обґрунтування максимальної довжини автономного ходу, який забезпечує тягова акумуляторна батарея, що нею обладнаний тролейбус.

***Ключові слова:** транспортний засіб, тролейбус, автономний хід, маршрут, енергоносія, батарея, витрата енергоносія.*



S. I. ANDRUSENKO

Ph. D., Professor,
Head of the Department of Motor Vehicle Maintenance and Service
National Transport University
ORCID: 0000-0002-9914-0200

V. B. BUDNYCHENKO

Ph. D., Associate Professor,
Associate Professor at the Department of Motor Vehicle Maintenance and Service
National Transport University
ORCID: 0000-0002-1235-3781

V. S. PODPISNOV

Senior Lecturer at the Department of Motor Vehicle Maintenance and Service
National Transport University
ORCID: 0000-0002-8583-1502

METHOD FOR ESTIMATING THE REQUIRED ENERGY CAPACITY OF A TRACTION BATTERY UNDER SPECIFIED ROUTE OPERATING CONDITIONS

This article lies within the field of transport engineering and addresses a relevant challenge in the development of urban electric transport, particularly trolleybuses with autonomous operation capability. The study focuses on substantiating the required energy capacity of a traction battery to ensure reliable trolleybus operation along route sections lacking an overhead contact network. The relevance of the research is обусловлена the ongoing transition to environmentally sustainable transport systems and the need to replace conventional diesel buses with electric alternatives.

Based on a critical analysis of existing approaches to battery capacity determination – most of which rely on averaged statistical data and fail to account for the specific operating conditions of individual routes – the authors propose a novel method. The proposed approach incorporates key operational parameters, including the length of the autonomous section, the number of stops, operating speed, road gradients, and passenger load.

The method is grounded in the mathematical modeling of energy consumption during vehicle operation. It takes into account the energy required for acceleration, overcoming motion resistance, supplying auxiliary systems, and ensuring passenger comfort, as well as energy losses and partial recovery through regenerative braking. This enables a more accurate estimation of total route energy consumption and, consequently, a more substantiated determination of the required battery capacity.

The results obtained are of both theoretical and practical significance. The proposed method can be utilized by transport operators in the development of tender documentation for the procurement of trolleybuses with autonomous operation capability. It may also be applied by manufacturers to justify the maximum autonomous range provided by the traction battery installed in a trolleybus.

Key words: vehicle, trolleybus, autonomous operation, route, energy carrier, battery, energy consumption.

Постановка проблеми

На виконання у 2023 році Закону України «Про деякі питання використання транспортних засобів, оснащених електричними двигунами, та внесення змін до деяких законів України щодо подолання паливної залежності і розвитку електрозарядної інфраструктури та електричних транспортних засобів» [1] виробники троллейбусів в Україні почали виготовляти троллейбуси з автономним ходом. Застосування таких троллейбусів дозволяє виконати вимогу прийнятого Закону щодо заміни автобусів з дизельними силовими установками на електробуси на тих автобусних маршрутах, що мають окремі ділянки, де наявна контактна мережа троллейбусного транспорту. Для таких випадків троллейбус, який замінить автобус, повинен мати функцію автономного ходу, щоб забезпечити можливість руху без живлення від контактної мережі на ділянках автобусного маршруту, де вона відсутня, та мати можливість заряджання тягової акумуляторної батареї (ТАБ) під час руху ділянкою, що має контактну мережу. Забезпечення додаткової функції руху автономним ходом потребує обґрунтування енергетичної ємності тягової акумуляторної батареї троллейбуса, який передбачається використовувати замість автобуса.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Проблемі раціонального використання ресурсів під час експлуатації міського електричного транспорту присвячена значна кількість робіт вітчизняних та зарубіжних вчених, переважна більшість яких виконана за напрямом обґрунтування технічних характеристик транспортних засобів з електричною тяговою установкою та умов доцільності їхнього застосування, зокрема частина робіт присвячена питанням заряджання тягових акумуляторних батарей та збільшенню терміну їхньої експлуатації за рахунок оцінки енергоспоживання транспортного засобу з електричною тяговою установкою [2, 3, 4, 5, 6, 7, 8]. У роботах [9, 10, 11, 12, 13] були розглянуті економічні аспекти застосування транспортних засобів з електричною тяговою установкою. Проте початку виконання

науково-дослідних робіт за напрямом обґрунтування енергетичної ємності тягової акумуляторної батареї для забезпечення автономного ходу тролейбуса сприяла відсутність стандартизованого методу такого обґрунтування. Так, першим кроком були роботи фахівців Національного транспортного університету, в яких розглядалися питання оптимізації параметрів тягової акумуляторної батареї [14], а також роботи щодо обґрунтування доцільності використання накопичувачів енергії [15] та оцінки експлуатаційних витрат автобусів та тролейбусів з різними видами силових установок [16].

Усі запропоновані методи на сьогодні ґрунтуються на статистичних даних про витрати енергоносія в місті, що замовляє новий тролейбус з автономним ходом, і не враховують умови, які мають місце на конкретному маршруті, де передбачається експлуатація тролейбуса, та його технічні характеристики.

Формулювання мети дослідження

Метою статті є обґрунтування енергетичної ємності тягової акумуляторної батареї, що враховує умови руху на ділянці автономного ходу та технічні характеристики тролейбуса.

Для досягнення поставленої мети мають бути вирішені такі завдання:

- аналіз існуючих підходів до визначення енергетичної ємності тягових акумуляторних батарей та виявлення їхніх обмежень;
- визначення сукупності основних експлуатаційних факторів, що впливають на енергоспоживання тролейбуса під час автономного ходу;
- формування структури енергетичних витрат транспортного засобу під час руху автономним ходом із урахуванням усіх складових;
- розроблення математичних залежностей для визначення кожної складової витрат енергії та побудова узагальненої математичної моделі енергоспоживання на ділянці автономного ходу;
- представлення аналітичного виразу для визначення необхідної енергетичної ємності тягової акумуляторної батареї з урахуванням умов експлуатації;
- обґрунтування можливостей практичного застосування розробленого методу для оцінювання параметрів тролейбусів під час їхньої закупівлі та проектування.

Викладення основного матеріалу дослідження

У разі відсутності в тендерній документації статистичних даних про витрату енергоносія, енергетична ємність тягової акумуляторної батареї може бути обґрунтована, якщо замовник транспортного засобу надасть додатково таку інформацію:

- довжину ділянки, де має бути застосовано автономний хід тролейбуса;
- середню відстань між зупинками на ділянці автономного ходу або кількість зупинок;
- приведений ухил на ділянці автономного ходу;
- швидкість сполучення на маршруті, який планується подовжити, застосувавши автономний хід тролейбуса;
- очікувану наповненість тролейбуса.

Для цього випадку витрати енергоносія під час руху автономним ходом можуть бути визначені так:

$$E = E_k + E_{op} + E_{vp} + E_{yx}, \quad (1)$$

де E_k – кількість енергоносія, яка витрачається на досягнення максимальної швидкості руху на ділянці автономного ходу між зупинками;

E_{op} – кількість енергоносія, яка витрачається на додання опору руху;

E_{vp} – кількість енергоносія, яка витрачається на забезпечення комфорту пасажирів та водія;

E_{yx} – кількість енергоносія, яка витрачається на додання ухилів.

Кількість енергоносія E_k має дві складові, а саме:

$$E_k = E_k^p + E_k^f, \quad (2)$$

де E_k^p – кількість енергоносія, що витрачається на створення кінетичної енергії транспортного засобу під час збільшення його швидкості;

E_k^f – кількість енергоносія, що буде повернуто до джерела енергії під час рекуперативного гальмування.

Кількість енергоносія, що витрачається на створення кінетичної енергії транспортного засобу під час збільшення його швидкості, можна визначити так:

$$E_k^p = k_{df} \cdot \frac{0,5 \cdot k_i \cdot m \cdot V_{max}^2 \cdot n}{k_n}, \quad (3)$$

де m – маса транспортного засобу з урахуванням наповнення пасажирами, кг;

V_{max} – максимальна швидкість транспортного засобу, яка може бути досягнута під час руху між зупинками, км/год;

k_n – коефіцієнт втрат під час перетворення кінетичної енергії в електричну і навпаки, $k_n = 0,8$;

k_i – коефіцієнт, що враховує наявність обертових мас, $k_i = 1,1$;

n – кількість зупинок на ділянці автономного ходу;

– коефіцієнт перетворення Дж в кВт·год ($k_{dj} = 2,777 \times 10^{-7}$ кВт·год).

Максимальну швидкість руху на ділянці автономного ходу пропонується визначити так:

$$V_{\max} = 2V_{cp}, \quad (4)$$

де V_{cp} – швидкість сполучення на маршруті, км/год.

Кількість енергоносія, що може бути рекуперовано до джерела енергії під час гальмування, не може бути більше кінетичної енергії транспортного засобу, яку він має на момент початку зменшення швидкості до його повної зупинки, а саме:

$$E_k^r \leq k_r \cdot E_k^p \cdot k_n \cdot n, \quad (5)$$

де – коефіцієнт, що враховує частину кінетичної енергії, яка може бути рекуперована під час рекуперативного гальмування, що залежить від конструктивних рішень тягового приводу транспортного засобу та здатності ТАБ прийняти рекуперовану енергію.

Оскільки під час гальмування частина енергоносія надходить до джерела енергії, то його загальні витрати під час пуску та гальмування будуть такими:

$$E_k = E_k^p - E_k^r \quad (6)$$

Вираз (6), з урахуванням виразів (3-5), буде мати такий вигляд:

$$E_k = n \cdot k_{dj} \cdot \frac{2 \cdot k_1 \cdot m \cdot V_{cp}^2}{k_n} (1 - k_r \cdot k_n). \quad (7)$$

Кількість енергоносія, яка витрачається на додання опору руху, може бути визначена так:

$$E_{op} = k_{HM} \cdot \frac{F_{op} \cdot L}{k_n}, \quad (8)$$

де k_{HM} – коефіцієнт перетворення Н·м в кВт·год ($k_{HM} = 3,1688765 \times 10^{-11}$ кВт·год);

F_{op} – сила опору руху транспортного засобу, яка визначається експериментально для кожного типу тролейбуса, Н;
 L – довжина ділянки автономного ходу, м.

Кількість енергоносія, яка витрачається на забезпечення комфорту пасажирів та водія, а також безпечність руху, визначається так:

$$E_{vp} = \frac{N_{cp} \cdot T_{cp}}{k_{HP}}, \quad (9)$$

де N_{cp} – максимальна потужність споживачів, що забезпечують комфорт пасажирів та водія, кВт;

T_{cp} – час руху ділянкою автономним ходом, год;

k_{HP} – коефіцієнт корисної дії перетворювачів, що живлять ці складові.

Максимальна потужність споживачів, що забезпечують комфорт пасажирів та водія, а також безпечність руху, мають братися, коли рух транспортного засобу здійснюється в зимовий період року та темну пору доби.

У цей період, як правило, увімкнено системи опалення салону та відділення водія, а також зовнішні світлові прилади та сигналізація. До цієї складової також мають бути додані потужності двигуна гідропідсилювача керма та компресорної установки.

У літній період року достатньо врахувати потужність двигуна гідропідсилювача керма та компресорної установки.

Час руху ділянкою автономного ходу можна визначити так:

$$T_p = \frac{L}{V_{СП}} \quad (10)$$

Тоді математична модель витрати енергоносія (9) з урахуванням (10) буде мати такий вигляд:

$$E_{vp} = \frac{N_{cp} \cdot L}{V_{СП} \cdot k_{HP}}. \quad (11)$$

Кількість енергоносія, яка буде витрачена на додання ухилу, може бути визначена так:

$$E_{yx} = E_{yx}^H - E_{yx}^r, \quad (12)$$

де E_{yx}^H – кількість енергоносія, яка буде витрачена під час підйому транспортного засобу на ухил, якщо він один, або приведений ухил, якщо їх декілька;

E_{yx}^r – кількість енергоносія, яка буде рекуперована під час спуску транспортного засобу з ухилу, якщо він один, або приведенного ухилу, якщо їх декілька.

Кількість енергоносія, яку треба витратити на додання підйому під час автономного ходу, можна визначити так:

$$E_{yx}^n = k_{dj} \left(\frac{m \cdot g \cdot h}{k_n} \right), \quad (13)$$

де h – висота підйому, якщо він один, або приведена висота підйому, якщо їх декілька, м;
 g – прискорення вільного падіння, м/с².

Під час спуску з ухилу генерується рекуперативна енергія, якою виконується заряджання тягової акумуляторної батареї. Цю кількість енергоносія можна визначити так:

$$E_{yx}^r = k_{dj} \cdot k_n \cdot k_r \cdot m \cdot g \cdot h. \quad (14)$$

Тоді вираз (12), з урахуванням (13) та (14), буде таким:

$$E_{yx} = k_{dj} (m \cdot g \cdot h) \cdot \left(\frac{1}{k_n} - k_n \cdot k_r \right). \quad (15)$$

Математична модель загальних витрат енергоносія (1), з урахуванням (7), (8), (11) та (15), буде мати такий вигляд:

$$E = n \cdot k_{dj} \cdot \frac{2 \cdot k_r \cdot m \cdot V_{sp}^2}{k_n} (1 - k_n \cdot k_n) + k_{HM} \frac{F_{op} \cdot L}{k_n} + \frac{N_{sp} \cdot L}{V_{СП} \cdot k_{HP}} + k_{dj} (m \cdot g \cdot h) \cdot \left(\frac{1}{k_n} - k_n \cdot k_r \right). \quad (16)$$

Обчислена за математичною моделлю (16) витрата енергоносія для літнього періоду року світлої пори доби має бути робочим діапазоном ТАБ ($E_{л}$), а для зимового періоду року та темної пори доби має бути граничним діапазоном ТАБ ($E_{з}$). Загальна енергетична ємність ТАБ для заданої довжини автономного ходу, що запропонована у роботі [14], може бути записана у спрощеному вигляді і застосована для обґрунтування енергетичної ємності тягової акумуляторної батареї, а саме:

$$C_{ТАБ} = \max \left\{ \begin{array}{l} \frac{E_{з}}{k_{pd}} \\ \frac{E_{л}}{k_{kd}} \end{array} \right. \quad (17)$$

Практичним застосуванням вищезначеної методики є рекомендації щодо вибору ТАБ залежно від регламентованого ресурсу

Ці рекомендації застосовують, коли відомі:

- тип тролейбуса, наприклад Т12309;
- енергетична ємність ТАБ, яку планується застосувати, наприклад 78 кВт·год;
- регламентована замовником кількість циклів «розряд-заряд», наприклад 10000;
- маса тролейбуса у спорядженому стані, наприклад 12740 кг.
- завантаження пасажирями, що задана замовником як відсоток від його максимальної місткості, наприклад 60 %;
- довжина ділянки автономного ходу, наприклад 25 км.

Для цього випадку метод обґрунтування енергетичної ємності ТАБ має передбачати:

– дослідження питомих витрат енергоносія на підставі даних лічильників постійного струму, якими обладнано будь-який транспортний засіб, для проведення статистичних спостережень за їхніми витратами на підприємстві, куди планується постачання нових транспортних засобів;

– визначення маси транспортного засобу, яка відповідає заданому відсотку завантаження та коефіцієнту відношення мас тролейбуса, для якого було визначено питоме споживання енергоносія під час використання за призначенням, і тролейбуса, який планується для використання;

– визначення загальної енергетичної ємності ТАБ, яка забезпечує задану кількість циклів її роботи.

Питомі витрати енергоносія для обґрунтування необхідної загальної ємності ТАБ були визначені за результатами статистичних спостережень за показами лічильників постійного струму тролейбусів, які перебувають в експлуатації в КП «Київпаstrанс», а саме – тролейбусів типу Т9017. Отримані статистичні дані про транспортну роботу та витрати енергоносія подані у таблиці 1.

Відповідно до даних таблиці 1 обчислено середнє значення та довірчий інтервал згідно з ДСТУ ISO 2602 [17] і отримано такі значення:

- 1,62 кВт·год/км – середнє значення;
- 0,6 кВт·год/км – стандартне відхилення;
- 1,69 – величина розподілу Стюдента для 29 ступенів вільності та довірчої ймовірності 95 %;
- 2,64 кВт·год/км – максимальнє значення питомих витрат електроенергії.

Таблиця 1

Статистичні дані про витрати енергоносія та транспортну роботу тролейбусів типу Т90117 за добу

Номер маршруту тролейбуса	Пробіг, км	Енергія спожита тяговим приводом, кВт·год	Кількість рекуперованої енергії, кВт·год	Загальна кількість спожитої енергії, кВт·год	Загальна кількість рекуперованої енергії, кВт·год
3	132,95	131,89	20,84	149,73	19,41
4	88,33	97,54	21,59	121,02	20,73
11	58,83	67,45	13,74	80,34	12,94
15	61,92	55,25	8,29	65,38	8,04
16	59,08	71,98	14,21	82,37	13,56
16	58,74	74,34	16,22	85,60	15,45
21	103,35	115,73	9,61	69,90	1,24
22	63,36	51,07	6,88	69,15	7,17
27	95,25	106,78	22,90	129,95	22,34
28	83,52	80,29	10,10	90,99	9,78
29	61,74	63,79	12,52	76,42	11,86
30	103,59	114,21	20,48	139,02	20,26
34	61,84	56,68	5,26	66,39	5,19
34	62,02	57,55	4,97	67,29	5,04
35	59,51	60,67	11,74	199,66	5,32
39	125,06	152,73	15,02	171,86	14,04
40	124,70	131,08	26,22	156,62	25,73
40	47,48	49,56	10,31	63,31	10,21
13	49,67	59,12	16,04	71,09	15,08
37	63,39	62,70	11,41	74,83	11,23
5	62,73	67,39	7,73	76,13	7,44
19	108,69	116,96	17,11	136,05	17,55
25	135,78	138,56	9,19	161,56	8,86
2	65,76	81,06	13,02	92,68	11,55
32	61,66	66,24	10,87	75,93	10,24
6	67,15	84,88	10,42	96,53	9,75
26	109,94	107,42	16,24	133,21	16,46
36	100,15	130,97	21,07	149,03	19,96
14	125,15	127,97	24,03	145,14	23,42

Загальну енергетичну ємність ТАБ, яка забезпечує задану кількість циклів її роботи, обчислюють так:

$$C_{ТАБ} = \max \left\{ \begin{array}{l} \frac{e_{cp} \cdot L}{k_{pd} \cdot k_m}, \\ \frac{e_{max} \cdot L}{k_{kd} \cdot k_m} \end{array} \right. \quad (18)$$

де e_{cp} – середні витрати енергоносія;

e_{max} – максимальні витрати енергоносія, прийняті як максимальне їхнє значення, отримане за результатами обчислення однобічного довірчого інтервалу;

k_{pd} – коефіцієнт, який визначає частку «розряд-заряд» робочого діапазону енергетичної ємності ТАБ, $k_{pd} = 0,6$;

– коефіцієнт, який визначає частку «розряд-заряд» граничного діапазону енергетичної ємності ТАБ, $k_{kd} = 0,8$;

k_m – відношення маси тролейбуса, для якого отримано питомий показник витрат енергоносія, до маси транспортного засобу, який буде постачатися;

L – довжина ділянки автономного ходу.

Відомо, що маса тролейбуса Т90117 у спорядженому стані становить 17900 кг, а його максимальна пасажиромісткість 184 пасажирів. У [18] зазначено, що маса одного пасажирів 65 кг, отже, маса тролейбуса Т90117 з завантаженням 60 % може бути обчислена так:

$$m_i = m_c + \frac{k_{\%} \cdot \Pi \cdot m_{п}}{100} \quad (19)$$

де m_c – маса транспортного засобу у спорядженому стані, кг;

$k_{\%}$ – відсоток завантаження транспортного засобу, заданий замовником, %;

Π – максимальна пасажиромісткість транспортного засобу, пас;

$m_{п}$ – регламентована [18] маса одного пасажирів.

Таблиця 2

Питомі електричної енергії тролейбусами Богдан Т90110

Номер маршруту тролейбуса	Питома енергія, спожита тяговим приводом, кВт·год/км	Питома кількість рекуперованої енергії, кВт·год/км	Загальна питома кількість спожитої енергії, кВт·год/км	Загальна питома кількість рекуперованої енергії, кВт·год/км	% рекуперованої енергії	% загальної кількості рекуперованої енергії	Різ-ниця
2	1,23	0,20	1,41	0,18	16	12	4
3	2,01	0,32	2,28	0,30	16	13	3
4	1,48	0,33	1,84	0,32	22	17	5
5	1,02	0,12	1,16	0,11	11	10	2
6	1,29	0,16	1,47	0,15	12	10	2
11	1,03	0,21	1,22	0,20	20	16	4
13	0,90	0,24	1,08	0,23	27	21	6
14	1,95	0,37	2,21	0,36	19	16	3
15	0,84	0,13	0,99	0,12	15	12	3
16	1,09	0,22	1,25	0,21	20	16	3
17	1,13	0,25	1,30	0,23	22	18	4
18	0,88	0,08	1,02	0,08	9	7	1
19	1,78	0,26	2,07	0,27	15	13	2
21	1,76	0,15	1,06	0,02	8	2	7
22	0,78	0,10	1,05	0,11	13	10	3
25	2,11	0,14	2,46	0,13	7	5	1
26	1,63	0,25	2,03	0,25	15	12	3
27	1,62	0,35	1,98	0,34	21	17	4
28	1,22	0,15	1,38	0,15	13	11	2
29	0,97	0,19	1,16	0,18	20	16	4
30	1,74	0,31	2,11	0,31	18	15	3
32	1,01	0,17	1,15	0,16	16	13	3
34	0,86	0,08	1,01	0,08	9	8	1
35	0,92	0,18	3,04	0,08	19	3	17
36	1,99	0,32	2,27	0,30	16	13	3
37	0,95	0,17	1,14	0,17	18	15	3
38	1,99	0,40	2,38	0,39	20	16	4
39	2,32	0,23	2,61	0,21	10	8	2
40	0,75	0,16	0,96	0,16	21	16	5

Відповідно до (19) маса тролейбуса Т90117 за умови 60 % завантаження пасажирями буде складати 25076 кг.

Тролейбус Т12309 має масу у спорядженому стані 12740 кг і пасажиромісткість 97 пасажирів, отже, з 60 % завантаженням, обчисленим згідно з (19), його маса складатиме 16023 кг. Тоді відношення маси тролейбуса $k_m = 1,57$.

Відповідно до виразу (18), необхідна енергетична ємність ТАБ для довжини ділянки автономного ходу від 5 км буде такою:

$$C_{ТАБ} = \max \left\{ \begin{array}{l} \frac{1,62 \cdot 5}{0,6 \cdot 1,57} \\ \frac{2,64 \cdot 5}{0,8 \cdot 1,57} \end{array} \right. = 10,5 \text{ кВт·год.}$$

Результати обчислення необхідної енергетичної ємності ТАБ для різних довжин ділянок автономного ходу подані в таблиці 3, на підставі чого виконано вибір типу ТАБ, типоряд яких поданий у ТУ У 27.2-36476580-007 [19].

Таблиця 3

Вибір типу тягової акумуляторної батареї

Довжина ділянки автономного ходу, км	5	10	15	20	25	30
Робочий діапазон розряду ТАБ, кВт·год	8,6	17,2	25,8	34,4	43,0	51,6
Критичний діапазон розряду ТАБ, кВт·год	10,5	21,0	31,5	42,0	52,5	63,1
Необхідна енергетична ємність ТАБ	10,5	21,0	31,5	42,0	52,5	63,1
Прийнята згідно з ТУ У 27.2-36476580-007 енергетична ємність ТАБ	32,4	32,4	32,4	45	57	78
Тип ТАБ	ТБЕТ3.01	ТБЕТ3.01	ТБЕТ3.01	ТБЕТ3.041	ТБЕТ3.051	ТБЕТ3.071

Висновки

За результатами даного дослідження розроблена математична модель для визначення енергетичної ємності тягової акумуляторної батареї, яка має бути застосована, коли відомі умови руху на ділянці автономного ходу тролейбуса, а саме: довжина ділянки, швидкість сполучення, приведений ухил.

Цю математичну модель треба застосовувати перед постачанням тролейбуса з автономним ходом, щоб упевнитися, що вибрана за статистичними даними енергетична ємність ТАБ дійсно може забезпечити автономний хід на задану замовником нового тролейбуса довжину ділянки.

Подальші дослідження за цим напрямом мають бути виконані з метою уточнення енергоспоживання окремих складових тролейбуса під час руху ділянкою маршруту в різні періоди року та пори доби, щоб забезпечити безвідмовну роботу тягової акумуляторної батареї внаслідок недостатнього запасу енергоносія.

Список використаної літератури

1. Про деякі питання використання транспортних засобів, оснащених електричними двигунами, та внесення змін до деяких законів України щодо подолання паливної залежності і розвитку електророзрядної інфраструктури та електричних транспортних засобів : Закон України від 24 лютого 2023 р. № 2956-IX / *Верховна Рада України*. URL : <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2956-20/#Text>.
2. Lajunen, A., Kivekaes, K., Baldi, F., Vepsae-Laeninen, J. & Tammi, K. (2018). Different Approaches to Improve Energy Consumption of BatteryElectricBuses. *IEEE Vehicle Powerand Propulsion Conference (VPPC)*. 1-6. DOI : <https://doi.org/10.1109/VPPC.2018.8605024>.
3. 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. DOI: <https://doi.org/10.1109/TVT.2019.2936772>.
4. Houbbadi, A., Trigui, R., Pelissier, S., Redondo-Iglesias, E. & Bouton, T. (2019). Optimal Scheduling to Manage an Electric Bus Fleet Overnight Charging. *Energies*, 12(14), 2727. DOI : <https://doi.org/10.3390/en12142727>.
5. 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*, Vol. 130, September 2020. DOI : <https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.109978>.
6. Torabi, S., Bellone M. & Wahde M. (2020). Energy minimization for an electric bus using a genetic algorithm. *European Transport Research Review*. Vol. 12, article 2. DOI : <https://doi.org/10.1186/s12544-019-0393-1>.
7. Hatem, A. & Moataz M. (2021). A Prediction Model for Battery Electric Bus Energy Consumption in Transit. *Energies*, 14(10), 2824. DOI: <https://doi.org/10.3390/en14102824>.
8. Проценко В.О. Перспективи удосконалення пасажирського сполучення в місті Херсоні застосуванням тролейбусів з автономним ходом. *Вісник Херсонського національного технічного університету. Серія «Інженерні науки»*. 2025. № 2(93). Том 1. С. 191-201. DOI : <https://doi.org/10.35546/kntu2078-4481.2025.2.1.26>.
9. Zhu Chao, Chen Xiaohong (2013). Optimizing Battery Electric Bus Transit Vehicle Scheduling with Battery Exchanging: Model and Case Study. *13th COTA International Conference of Transportation Professionals (CICTP 2013)*. DOI : <https://doi.org/10.1016/j.sbspro.2013.08.306>.
10. Houbbadi, A., Trigui R., Pelissier S., Bouton T. & Eduardo R.-I. (2017). Multi-Objective Optimisation of the Management of Electric Bus Fleet Charging. DOI : <https://doi.org/10.1109/VPPC.2017.8331015>.
11. Yusheng Wang, Yongxi Huang, Jiuping Xu, Nicole Barclay (2017). Optimal recharging scheduling for urban electric buses: A case study in Davis. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*. Volume 100, April 2017, 115-132. DOI : <https://doi.org/10.1016/j.tre.2017.01.001>.
12. Borén, S. (2020). Electric buses' sustainability effects, noise, energy use, and costs. *International Journal of Sustainable Transportation*. Vol. 14 (2020) – Issue 12. 956-971. DOI : <https://doi.org/10.1080/15568318.2019.1666324>.
13. Hnatov A., Arhun, Shch., Ponikarovska, S. (2022). Energy saving technologies for urban bus transport. *International Journal of Automotive and Mechanical Engineering*. No.14(4). 4649-4664. DOI : <https://doi.org/10.15282/ijame.14.4.2017.5.0366>.
14. Андрусенко С.І., Будниченко В.Б., Подпіснєв В.С. Математична модель енергетичної ємності тягової акумуляторної батареї. *Вісник Національного транспортного університету. Серія «Технічні науки». Науково-технічний збірник*. Київ : НТУ, 2021. Вип. 3 (50). С. 3-10. DOI: <https://doi.org/10.33744/2308-6645-2021-3-50-003-010>.
15. Андрусенко С.І., Будниченко В.Б., Бугайчук О.С., Подпіснєв В.С. Обґрунтування доцільності використання накопичувачів енергії в електромережах міського транспорту та домогосподарств. *Вісник Національного транспортного університету. Серія «Технічні науки». Науково-технічний збірник*. 2020. Вип. 1 (46). С. 3-13. DOI : doi.org/10.33744/2308-6645-2020-1-46-003-013.
16. Андрусенко С.І., Будниченко В.Б., Подпіснєв В.С. Розробка методик визначення експлуатаційних витрат автобусів та тролейбусів з різними видами силових установок. *Науково-виробничий журнал «Автошляховик України» (Автомобільний транспорт)*. 2022. № 2 (270)'2022. С. 15-25. DOI : doi.org/10.33868/0365-8392-2022-2-270-15-25.

17. ДСТУ ISO 2602:2006. Подавання результатів випробування статистичне. Оцінювання середнього значення. Довірчий інтервал (ISO 2602:1980, IDT). [Чинний від 2007-10-01]. Київ : УкрНДНЦ, 2009. 6 с.
18. Правила ЄЕК ООН № 107-09 Єдині технічні приписи щодо офіційного затвердження колісних транспортних засобів категорій М2 і М3 стосовно їхньої загальної конструкції. URL : <https://unece.org/transport/documents/2024/05/standards/addendum-106-un-regulation-no-107-revision-9>.
19. ТУ У 27.2-36476580-007:2023 Батарея тягова акумуляторна літій-іонна, типу ТБЕТЗ. Технічні умови. [Чинні від 2024-01-01]. Бровари : ТОВ «ПОЛІТЕХНОСЕРВІС», 2023. 21 с.

References

1. *Verkhovna Rada of Ukraine. Zakon Ukrainy «Pro deiakі pyttannia vykorystannia transportnykh zasobiv, osnashchenykh elektrychnymy dvyhunamy, ta vnesennia zmin do deiakyykh zakoniv Ukrainy shchodo podolannia palyvnoi zalezhnosti i rozvytku elektrozariadnoi infrastruktury ta elektrychnykh transportnykh zasobiv»* [A law of Ukraine is "On Certain Issues Concerning the Use of Vehicles Equipped with Electric Motors and on Amendments to Certain Legislative Acts of Ukraine Regarding the Reduction of Fuel Dependence and the Development of Electric Vehicle Charging Infrastructure and Electric Vehicles"]. Retrieved from <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2956-20/#Text> [in Ukrainian].
2. Lajunen, A., Kivekaes, K., Baldi, F., Vepsae-Laeinen, J. & Tammi, K. (2018). Different Approaches to Improve Energy Consumption of BatteryElectricBuses. *IEEE Vehicle Powerand Propulsion Conference (VPPC)*. 1-6. DOI : <https://doi.org/10.1109/VPPC.2018.8605024> [in English].
3. 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. DOI: <https://doi.org/10.1109/TVT.2019.2936772> [in English].
4. Houbbadi, A., Trigui, R., Pelissier, S., Redondo-Iglesias, E. & Bouton, T. (2019). Optimal Scheduling to Manage an Electric Bus Fleet Overnight Charging. *Energies*, 12(14), 2727. DOI : <https://doi.org/10.3390/en12142727> [in English].
5. 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*, Vol. 130, September 2020. DOI : <https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.109978> [in English].
6. Torabi, S., Bellone M. & Wahde M. (2020). Energy minimization for an electric bus using a genetic algorithm. *European Transport Research Review*. Vol. 12, article 2. DOI : <https://doi.org/10.1186/s12544-019-0393-1> [in English].
7. Hatem, A. & Moataz M. (2021). A Prediction Model for Battery Electric Bus Energy Consumption in Transit. *Energies*, 14(10), 2824. DOI: <https://doi.org/10.3390/en14102824> [in English].
8. Protsenko, V. (2025). Perspektyvy udoskonalennia pasazhyrskoho spoluchennia v misti Khersoni zastosuvanniam troleibusiv z avtonomnym khodom [Prospects for improving passenger communication in the city of Kherson by using autonomous trolleybuses]. *Visnyk Khersonskoho natsionalnoho tekhnichnoho universytetu. Serii «Inzhenerni nauky»* [Visnyk of Kherson National Technical University. Section «Engineering Sciences»]. Vol. 1 No. 2(93). 191-201. DOI : <https://doi.org/10.35546/kntu2078-4481.2025.2.1.26> [in Ukrainian].
9. Zhu Chao, Chen Xiaohong (2013). Optimizing Battery Electric Bus Transit Vehicle Scheduling with Battery Exchanging: Model and Case Study. *13th COTA International Conference of Transportation Professionals (CICTP 2013)*. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.sbspro.2013.08.306> [in English].
10. Houbbadi, A., Trigui R., Pelissier S., Bouton T. & Eduardo R.-I. (2017). Multi-Objective Optimisation of the Management of Electric Bus Fleet Charging. DOI: <https://doi.org/10.1109/VPPC.2017.8331015> [in English].
11. Yusheng Wang, Yongxi Huang, Jiuping Xu, Nicole Barclay (2017). Optimal recharging scheduling for urban electric buses: A case study in Davis. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*. Volume 100, April 2017, 115-132. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.tre.2017.01.001> [in English].
12. Borén, S. (2020). Electric buses' sustainability effects, noise, energy use, and costs. *International Journal of Sustainable Transportation*. Vol. 14 (2020) – Issue 12. 956-971. DOI: <https://doi.org/10.1080/15568318.2019.1666324> [in English].
13. Hnatov A., Arhun, Shch., Ponikarovska, S. (2022). Energy saving technologies for urban bus transport. *International Journal of Automotive and Mechanical Engineering*. No.14(4). 4649-4664. DOI: <https://doi.org/10.15282/ijame.14.4.2017.5.0366> [in English].
14. Andrusenko, S., Budnychenko, V., and Podpisnov, V. (2021). Matematychna model enerhetychnoi yemnosti tiahovoi akumuliatornoї batarei [Mathematical model of traction battery capacity]. *Visnyk Natsionalnoho transportnoho universytetu. Serii «Tekhnichni nauky». Naukovo-tekhnichniy zbirnyk* [Bulletin of National Transport University. Series «Technical Sciences». A Scientific and Technical Journal]. Kyiv. National Transport University. 2021. Vol. 3 (50). 3-10. DOI: <https://doi.org/10.33744/2308-6645-2021-3-50-003-010> [in Ukrainian].
15. Andrusenko, S., Budnychenko, V., Buhaichuk, O., and Podpisnov, V. (2020). Obgruntuvannia dotsilnosti vykorystannia nakopychuvachiv enerhii v elektromerezhakh miskoho transportu ta domohospodarstv [Business case

for application of energy storage units in urban transport and home power grids]. *Visnyk Natsionalnoho transportnoho universytetu. Seriya «Tekhnichni nauky»*. Naukovo-tekhnichnyi zbirnyk [Bulletin of National Transport University. Series «Technical Sciences». A Scientific and Technical Journal]. Kyiv. National Transport University. 2020. Vol. 1 (46). 3-13. DOI: doi.org/10.33744/2308-6645-2020-1-46-003-013 [in Ukrainian].

16. Andrusenko, S., Budnychenko, V., and Podpisnov, V. (2022). Rozrobka metodyky vyznachennia ekspluatatsiinykh vytrat avtobusiv ta troleibusiv z riznymi vydamy sylovykh ustanovok [Methods for operating costs calculating for buses and trolleybuses equipped with different types of power plants]. *Naukovo-vyrobnychi zhurnal "Avtoshliakhovyk Ukrainy" (Avtomobilnyi transport) [A Scientific and Industrial Journal "The Avtoshliakhovyk Ukrainy" (Motor transport)]*. 2022. Vol. 2 (270)'2022. 15-25. DOI: doi.org/10.33868/0365-8392-2022-2-270-15-25 [in Ukrainian].

17. State Enterprise “Ukrainian Scientific, Research and Training Center for Standardization, Certification and Quality” (UkrNDNC). (2009). DSTU ISO 2602:2006. Statistical interpretation of test results – Estimation of the mean – Confidence interval (ISO 2602:1980, IDT). Kyiv, Ukraine.

18. Regulation No 107 Revision 9 of the Economic Commission for Europe of the United Nations (UN/ECE) – Uniform provisions concerning the approval of category M2 or M3 vehicles with regard to their general construction. Retrieved from : <https://unece.org/transport/documents/2024/05/standards/addendum-106-un-regulation-no-107-revision-9> [in English].

19. Politekhnoservis LLC (2023). TU U 27.2-36476580-007:2023. Lithium-ion traction battery, type ТБЕТЗ. *Technical specifications*. Brovary, Ukraine [in Ukrainian].

Дата першого надходження статті до видання: 13.04.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 08.05.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті: 26.05.2026