

МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ЕНЕРГЕТИЧНОЇ ЄМНОСТІ ТЯГОВОЇ АКУМУЛЯТОРНОЇ БАТАРЕЇ

Андрусенко С.І., кандидат технічних наук, Національний транспортний університет, Київ, Україна, sergeandrusenko@gmail.com, orcid.org/0000-0002-9914-0200

Будниченко В.Б., кандидат технічних наук, Національний транспортний університет, Київ, Україна, budnjb@i.ua, orcid.org/0000-0002-1235-3781

Подписнов В.С., Національний транспортний університет, Київ, Україна, vpodpisnov@ukr.net, orcid.org/0000-0002-8583-1502

MATHEMATICAL MODEL OF TRACTION BATTERY CAPACITY

Andrusenko S.I., Ph.D. in Technical Science, National Transport University, Kyiv, Ukraine, sergeandrusenko@gmail.com, orcid.org/0000-0002-9914-0200

Budnychenko V.B., Ph.D. in Technical Science, National Transport University, Kyiv, Ukraine, budnjb@i.ua, orcid.org/0000-0002-1235-3781

Podpisnov V.S., National Transport University, Kyiv, Ukraine, vpodpisnov@ukr.net, orcid.org/0000-0002-8583-1502

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ ЕМКОСТИ ТЯГОВОЙ АККУМУЛЯТОРНОЙ БАТАРЕИ

Андрусенко С.И., кандидат технических наук, Национальный транспортный университет, Киев, Украина, sergeandrusenko@gmail.com, orcid.org/0000-0002-9914-0200

Будниченко В.Б., кандидат технических наук, Национальный транспортный университет, Киев, Украина, budnjb@i.ua, orcid.org/0000-0002-1235-3781

Подписнов В.С., Национальный транспортный университет, Киев, Украина, vpodpisnov@ukr.net, orcid.org/0000-0002-8583-1502

Постановка проблеми.

Застосування транспортних засобів з електричною тяговою установкою для пасажирських перевезень є актуальним напрямом організації пасажирських перевезень у містах України та інших держав.

Використання більш дешевих енергоносіїв та нульовий вплив на довкілля в містах робить актуальним застосування транспортних засобів з електричною тяговою установкою, наприклад тролейбусів, надаючи їм перевагу над іншими видами громадського транспорту, в першу чергу – над автобусом.

На даний час в Україні тролейбус функціонує в усіх обласних центрах, крім Ужгорода, разом з автобусним транспортом.

Виконуючи аналіз транспортної мережі будь-якого міста України, можна побачити, що існують маршрути, де використовуються автобуси, на яких окремі ділянки маршруту мають контактну мережу, яка необхідна для функціонування тролейбусного транспорту. Наприклад, автобусний маршрут № 32 в м. Києві (рисунок 1) за загальної довжини оборотного рейсу 26,6 км, має 16,4 км, де наявна контактна мережа, і 8,2 км, де вона відсутня.

За таких характеристик маршруту виникає питання доцільності заміни автобуса тролейбусом з автономним ходом (ТАХ), що не потребує додаткових капітальних вкладень для облаштування контактної мережі на ділянках автобусного маршруту, де вона відсутня.

На даний час промисловість України освоїла виготовлення тролейбусів з автономним ходом, які надійшли в експлуатацію до міст Кременчука, Вінниці, Харкова, Маріуполя і мають в якості накопичувачів енергії тягові акумуляторні батареї (ТАБ), енергетичні характеристики яких були вибрані без достатнього обґрунтування як наслідок відсутності методу їхнього визначення.

Вирішення питання доцільності застосування тролейбуса з автономним ходом замість автобуса ставить першочерговою задачею розроблення методу обґрунтування енергетичних характеристик тягової акумуляторної батареї залежно від умов руху на автобусному маршруті.

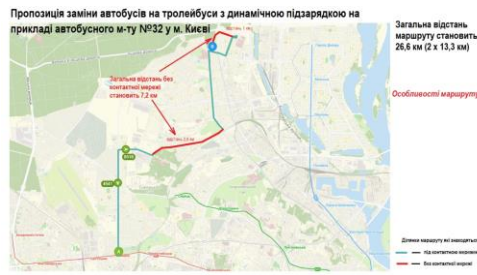


Рисунок 1 – Схема автобусного маршруту № 32 в м. Києві
Figure 1 – Bus route # 32 scheme (Kyiv)

Аналіз відомих нам публікацій. Основна кількість досліджень за останній час була присвячена методам визначення окремих показників транспортних засобів з електричним двигуном, які впливають на витрату енергоносія, наприклад, роботи [1, 2, 3]. Перші спроби оцінити можливість використання накопичувачів енергії для міського електричного транспорту були зроблені у 2013 році та викладені у роботі [4] і в подальшому отримали розвиток у роботі [5].

Жодні з зазначених досліджень не розглядали питання розроблення методу визначення енергетичних характеристик енергонакопичувача залежно від умов руху на автобусному маршруті, щоб обґрунтувати заміну автобуса на тролейбус з автономним ходом,

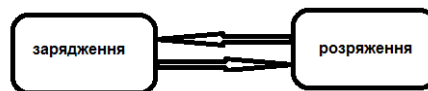
Метою даного дослідження є розроблення методу визначення енергетичних характеристик енергонакопичувача залежно від умов руху на маршруті для обґрунтування можливості заміни автобуса на тролейбус з автономним ходом.

Виклад основного матеріалу дослідження.

Заміна автобуса на тролейбус з автономним ходом може бути здійснена тільки за умови, що енергетична ємність тягової акумуляторної батареї достатня для забезпечення роботи такого тролейбуса на маршруті, де є ділянки, не обладнані контактною мережею.

Для визначення вимог до енергетичної ємності акумуляторної батареї розглянемо стани, в яких вона знаходиться під час руху тролейбуса на автобусному маршруті.

Для розгляду прийемо, що тролейбус з автономним ходом починає рух ділянкою маршруту, де відсутня контактна мережа, і його тягова акумуляторна батарея повністю заряджена. За цих умов, під час руху тролейбуса маршрутом, тягова акумуляторна батарея буде перебувати у двох станах відповідно до рисунку 2.



Рисунку 2 – Стани тягової акумуляторної батареї
Figure 2 – Traction battery conditions

Під час руху тролейбуса автобусним маршрутом на ділянці, де відсутня контактна мережа, тягова акумуляторна батарея втратить частину своєї ємності величиною C_p , а під час руху на ділянці, де наявна контактна мережа, вона отримає частину втраченої ємності C_3 .

У загальному випадку можливі наступні ситуації:

1) $C_p = C_3$. У цьому випадку кількість енергоносія, що є в тяговій акумуляторній батареї за один оборот на маршруті, не зміниться. На практиці ця ситуація малоймовірна, оскільки ділянки з контактною мережею та без неї можуть мати різну довжину. Також, струм розряду, як правило, перевищує струм заряду, що є однією з умов забезпечення встановленого ресурсу батареї;

2) $C_p < C_3$ – такий варіант можна не розглядати, оскільки пристрій, що здійснює зарядження тягової акумуляторної батареї, перестане її заряджати в разі отримання повного заряду;

3) $C_p > C_3$. У цьому випадку тягова акумуляторна батарея через певний час буде повністю розряджена, що має місце в тролейбусах з автономним ходом, які перебувають в експлуатації. Тому в подальших дослідженнях розглядається випадок, коли $C_p > C_3$.

Для третьої умови принципово важливим є кількість переходів зі стану «розрядження» до стану «зарядження», за якими тягова акумуляторна батарея буде розряджена до допустимого рівня C_{min} , що гарантує збереження її ресурсу.

За будь-який один елементарний перехід (один оборотний рейс) тягова акумуляторна батарея втрачає певну кількість запасу енергоносія:

$$\Delta_i = C_{pi} - C_{zi}. \quad (1)$$

Кількість переходів з одного стану в другий під час роботи транспортного засобу на маршруті залежить від кількості оборотних рейсів (m), тобто сумарні втрати енергоносія будуть такими:

$$m \cdot \Delta = m(C_p - C_z) \quad (2)$$

У цих дослідженнях ми використовуємо один оборот транспортного засобу на маршруті (рисунок 3), оскільки в загальному випадку рух його від одного кінцевого пункту (1) до іншого (2) може проходити різними вулицями, тобто мати різну довжину ($L_1 \neq L_2$).

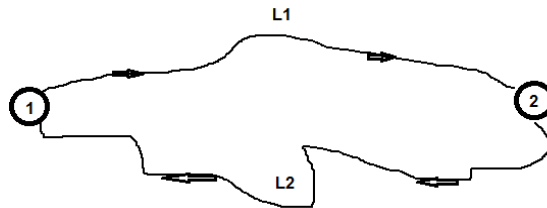


Рисунок 3 – Схема руху на умовному маршруті
Figure 3 – Traffic scheme for a conventional route

У разі завершення роботи транспортного засобу на маршруті необхідно, щоб тягова акумуляторна батарея не була розряджена більш ніж на величину $C_{max} = C - C_{min}$, де C та C_{min} – відповідно загальна енергетична ємність батареї та мінімально допустимий рівень розрядження батареї з умов максимізації ресурсу.

Тобто має бути виконана така умова:

$$m(C_p - C_z) \leq C_{max}, \quad (3)$$

На вибір методу визначення енергетичної ємності ТАБ впливає різниця між енергією, яка спожита від ТАБ, і енергією, яка отримана від зарядного пристрою під час руху тролейбуса на маршруті, що має ділянки без контактної мережі та ділянки з контактною мережею, за один оборотний рейс, а саме:

$$\Delta_e = H_0 \cdot G \cdot k_1 \cdot L_m - \frac{N \cdot (1 - k_1) L_m}{V_{cp}}, \quad (4)$$

де: H_0 – питома витрата електроенергії на рух тролейбуса маршрутом, кВт·год/(т·км);

N – потужність зарядного пристрою, кВт;

V_{cp} – середня експлуатаційна швидкість руху на маршруті, км/год

$L_m = L_k + L_{\delta k}$ – довжина маршруту;

L_k – довжина ділянок маршруту, що мають контактну мережу, км;

$L_{\delta k}$ – довжина ділянок маршруту, що не мають контактну мережу, км;

G – маса спорядженого тролейбуса;

k_1 – відношення довжини ділянки маршруту без контактної мережі до довжини маршруту за один оборотний рейс.

У цій формулі застосовується маса спорядженого тролейбуса G , а не маса тролейбуса з пасажирями, оскільки вважається, що кількість пасажирів, які перевозяться на маршруті, не зміниться.

Якщо $\Delta_e \leq 0$, це означає, що зарядний пристрій забезпечує 100 % зарядження ТАБ для заданої довжини ділянок маршруту з контактною мережею. У цьому випадку мінімальна енергетична ємність ТАБ, яку треба встановити на ТАХ з урахуванням її робочого діапазону, має дорівнювати:

$$C_{ТАБ} = \frac{1}{k_2} (H_0 \cdot G \cdot k_1 \cdot L_m), \quad (5)$$

де k_2 – коефіцієнт, який враховує робочий діапазон енергетичної ємності ТАБ без втрати її регламентованого ресурсу ($k_2 = 0,6$ для батареї літій-іонної групи).

Якщо $\Delta_e > 0$, це означає, що зарядний пристрій не забезпечує 100 % зарядження ТАБ для заданої довжини ділянок маршруту з контактною мережею. У цьому випадку мінімальна енергетична ємність ТАБ, яка буде використана (C_B), має дорівнювати:

$$C_B = H_0 \cdot G \cdot k_1 \cdot L_m \cdot \Delta_e(n - 1). \quad (6)$$

Або з урахуванням виразу (4) та робочого діапазону ТАБ її енергетична ємність ($C_{ТАБ}$), яку ТАБ повинна мати для застосування на ТАХ, має бути такою:

$$C_{ТАБ} = \frac{L_m}{k_2} \left(n \cdot H_0 \cdot G \cdot k_1 - (1 - k_1) \cdot N \cdot \frac{n-1}{v_{cp}} \right), \quad (7)$$

де n – кількість оборотних рейсів ТАХ за час його роботи на маршруті.

Висновки та перспективи подальшого дослідження.

Прийняття рішення щодо заміни автобуса на тролейбус з автономним ходом на міському маршруті потребує обґрунтування енергетичної ємності тягової акумуляторної батареї, яке має базуватися на таких характеристиках маршруту:

- середній швидкості руху;
- тривалості роботи транспортного засобу;
- питомих витратах електроенергії;
- масі транспортного засобу;
- частці ділянки автобусного маршруту, яка не має контактної мережі, від загальної довжини маршруту;
- частці енергетичної ємності тягової акумуляторної батареї, яка може бути витрачена для руху автономним ходом тролейбуса та забезпечує її встановлений ресурс;
- відношенні потужності зарядного пристрою до енергетичної ємності тягової акумуляторної батареї.

Отримана математична модель енергетичної ємності тягової акумуляторної батареї дозволяє:

- виробнику – виконати обґрунтування енергетичної ємності тягової акумуляторної батареї для тролейбуса з автономним ходом для заданих споживачем характеристик маршруту;
- споживачу – визначити перелік автобусних маршрутів, де можливо застосувати тролейбус з автономним ходом, що має тягову акумуляторну батарею з енергетичною ємністю, яка зазначена в його експлуатаційних документах; приймати рішення щодо застосування тролейбуса на інших маршрутах, у разі зменшення енергетичної ємності тягової акумуляторної батареї в експлуатації.

Подальші дослідження в напрямі обґрунтування ємності тягової акумуляторної батареї мають виконуватися з метою врахування ймовірнісних характеристик питомих витрат енергоносія, середньої швидкості руху та маси транспортного засобу.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Будниченко В.Б., Карпушин Е.І. Визначення нормативів витрат електроенергії на рух транспортних засобів // Системні методи керування, технологія та організація виробництва, ремонту і експлуатації автомобілів. – К: НТУ. – 2001. – Вип. 12. – С. 120-124.
2. Будниченко В.Б., Далека В.Х. Концепція визначення максимальної швидкості транспортного засобу з електричним рушієм під час спуску на ухилі // Східно-Європейський журнал передових технологій. – Х: Технологічний центр. – 2006. – Вип. 1/2(19). – С.78-81.
3. Будниченко В.Б., Яблонський Р.Ф. Аналіз математичних моделей визначення опору руху рухомого складу // Коммунальное хозяйство городов. – К: Техніка. – 2009. – Вип. 88. – С. 62-65.
4. Будниченко В.Б. Планування споживання електроенергії на електротранспорті за даними експлуатації / В.Б. Будниченко, В.Х. Далека, В.М. Шавкун // Автомобіль і електроніка. Сучасні технології. – Х: ХНАДУ, 2015. – № 8. – Режим доступу: http://car-electroniks.hol.es/argiv_2015_8.html. – Назва з екрану.
5. Будниченко В.Б., Шматков В.О., Далека В.Х. Випробування свинцево-кислотних акумуляторів з метою використання на міському електричному транспорті України // Комунальне господарство міст: Наук.-техн. зб. – Х., 2013. –Вип. 112. – С. 148-152.

6. Андрусенко С.І. Обґрунтування доцільності використання накопичувачів енергії в електромережах міського транспорту та домогосподарств / С.І. Андрусенко, В.Б. Будниченко, О.С. Бугайчук, В.С. Подпіснєв // Вісник Національного транспортного університету. Серія «Технічні науки». Науково-технічний збірник. – К.: НТУ, 2020. – Вип. 1 (46). – С. 3-13.

REFERENCES

1. Budnychenko, V.B., & Karpushyn, E.I. (2001). *Vyznachennia normatyviv vytrat elektroenerhii na rukh transportnykh zasobiv* [Determination of standards for electricity consumption for vehicles movement]. *Systemni metody keruvannia, tekhnolohiia ta orhanizatsiia vyrobnytstva, remontu ta ekspluatatsii avtomobiliv – System Control Methods, Technology and Management of Car Production, Repair and Operation*, 12, 120-124 [in Ukrainian].
2. Budnychenko, V.B., & Daleka, V.Kh. (2006). *Kontseptsiiia vyznachennia maksimalnoi shvydkosti transportnoho zasobu z elektrychnym rushiiem pid chas spusku na ukhyli* [Concept for determining the maximum speed of a downhill moving vehicle with an electric motor]. *Skhidno-Yevropeyskyi zhurnal peredovykh tekhnolohii – Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 1/2(19), 78-81 [in Ukrainian].
3. Budnychenko, V.B., & Yablonskyi, R.F. (2009). *Analiz matematychnykh modelei vyznachennia oporu rukhu rukhomoho skladu* [Analysis of mathematical models for rolling resistance determining]. *Kommunalnoe khoziaistvo horodov – Municipal Utilities*, 88, 62-65 [in Ukrainian].
4. Budnychenko, V.B., Daleka, V.Kh., & Shavkun, V.M. (2015). *Planuvannia spozhyvannia elektroenerhii na elektrotransporti za nanymy ekspluatatsii* [Planning of electricity consumption by electric vehicles according to operation data]. *Avtomobil i elektronika. Suchasni tekhnolohii – Vehicle and Electronics. Innovative Technologies*. – Available at: http://car-electroniks.hol.es/axiv_2015_8.html. – Title from Screen.
5. Budnychenko, V.B., Shmatkov, V.O., & Daleka, V.Kh. (2013). *Vyprobuvannia svyntsevo-kyslotnykh akumuliatoriv z metoiu vykorystannia na miskomu elektrychnomu transporti ukrainy* [Testing of lead-acid batteries for use in urban electric transport in Ukraine]. *Komunalne hospodarstvo mist – Municipal Utilities*, 112, 148-152 [in Ukrainian].
6. Andrusenko, S.I., Bugaichuk, O.S., Budnychenko V.B., & Podpisnov V.S. (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 – Bulletin of National Transport University*, 1 (46), 3-13 [in Ukrainian].

РЕФЕРАТ

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).

У статті викладено методологію визначення енергетичної ємності тягової акумуляторної батареї (ТАБ) колісних транспортних засобів, призначених для міських перевезень пасажирів, проаналізовано чинники, які впливають на енергетичну ємність тягової акумуляторної батареї, та розроблено її математичну модель.

Об'єкт дослідження – тягова акумуляторна батарея як накопичувач електроенергії для руху тролейбуса з автономним ходом (ТАХ) на ділянках маршруту, де відсутня контактна мережа.

Мета роботи – розроблення методу визначення енергетичних характеристик тягової акумуляторної батареї як енергонакопичувача залежно від умов руху на автобусному маршруті для обґрунтування можливості заміни автобуса на тролейбус з автономним ходом.

Методи дослідження – аналітичні та математичні.

Аналіз транспортної інфраструктури міст України, де одночасно функціонують автобусний і тролейбусний транспорт, показав, що в багатьох випадках існують автобусні маршрути, на окремих ділянках яких встановлена контактна тролейбусна мережа. У такому випадку виникає питання доцільності заміни автобуса тролейбусом з автономним ходом, що не потребує додаткових капітальних вкладень для облаштування контактної мережі на ділянках автобусного маршруту, де вона відсутня, завдяки використанню тролейбусів з автономним ходом. При цьому, вирішення питання доцільності застосування таких тролейбусів замість автобусів ставить першочерговою задачу розроблення методу обґрунтування енергетичних характеристик тягової акумуляторної батареї як накопичувача електричної енергії залежно від умов руху на автобусному маршруті.

Розглянуто та проаналізовано стани (зарядження та розрядження), в яких знаходиться тягова акумуляторна батарея під час руху тролейбуса на автобусному маршруті, при цьому, під час руху ділянкою, де відсутня контактна мережа, ТАБ втрапить частину своєї ємності величиною C_p , а під час руху ділянкою, де наявна контактна мережа, вона отримує частину втраченої ємності C_s . Розглядається випадок, коли $C_p > C_s$, що є найбільш імовірною ситуацією на практиці.

Наведені формули для визначення мінімальної енергетичної ємності ТАБ, яку треба встановити на ТАХ, з урахуванням різниці між енергією, яка спожита від ТАБ, і енергією, яка отримана від зарядного пристрою під час руху тролейбуса на маршруті, що має ділянки без контактної мережі та ділянки з контактною мережею, за один оборотний рейс.

Отримана математична модель енергетичної ємності тягової акумуляторної батареї дозволяє виробникам транспортних засобів виконати обґрунтування енергетичної ємності тягової акумуляторної батареї для тролейбуса з автономним ходом для заданих споживачем характеристик маршруту, а споживачам (замовникам транспортних послуг і підприємствам-перевізникам) – визначити перелік автобусних маршрутів, де можливо застосувати тролейбус з автономним ходом, що має тягову акумуляторну батарею з енергетичною ємністю, яка зазначена в його експлуатаційних документах, і прийняти рішення щодо застосування тролейбуса на інших маршрутах, у разі зменшення енергетичної ємності тягової акумуляторної батареї в експлуатації.

Подальші дослідження в напрямі обґрунтування ємності тягової акумуляторної батареї мають виконуватися з метою врахування ймовірнісних характеристик питомих витрат енергоносія, середньої швидкості руху та маси транспортного засобу.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: АВТОБУС, ТРОЛЕЙБУС, МАРШРУТ, КОНТАКТНА МЕРЕЖА, АВТОНОМНИЙ ХІД, ПИТОМИЙ ПОКАЗНИК, ТЯГОВА АКУМУЛЯТОРНА БАТАРЕЯ.

ABSTRACT

Andrusenko S.I., Budnychenko V.B., Podpisnov V.S. Mathematical model of traction battery capacity. Visnyk of National Transport University. Series «Technical sciences». Scientific and Technical Collection. – Kyiv: National Transport University, 2021. – Issue 3 (50).

The article describes the methodology for determining energy capacity of a traction battery for wheeled vehicles intended for urban passenger transportation. Then, the factors affecting energy capacity of a traction battery are analyzed. The mathematical model of traction battery capacity is developed.

The object of research is a traction storage battery as an electric energy storage device for autonomous driving trolleybus movement on route sections where there is no catenary.

The purpose of the study is to develop a method for determining the energy characteristics of a traction battery as an energy storage device depending on traffic conditions on a bus route to substantiate the possibility of replacing a bus with an autonomous trolleybus.

Research methods are analytical and mathematical.

Analysis of the transport infrastructure of Ukrainian cities, where bus and trolleybus transport operate simultaneously, showed that in many cases there are bus routes, on some sections of which a trolleybus contact network is installed. In this case, the question arises about the advisability of replacing the bus with a trolleybus with an autonomous running, which does not require additional capital investments for the installation of catenary on sections of the bus route where it is absent, thanks to trolleybuses with autonomous driving are used. At the same time, the solution of using such trolleybuses instead of buses sets the primary task of method developing for substantiating the energy characteristics of a traction battery as an electric energy accumulator, depending on the driving conditions in the bus route.

The states (charge and discharge) in which the traction battery is located when the trolleybus moves along the bus route are considered and analyzed. While moving along the section where there is no catenary, the TAB loses part of its capacity with a value of C_p , and when moving in an area where there is catenary, it will receive a part of the lost capacity C_s . The case is considered when $C_p > C_s$, which is the most likely situation in practice.

The formulas are given for determining the minimum energy consumption of the TAB, which should be installed on the TAS, taking into account the difference between the energy received from the TAB and the energy received from the charger when the trolleybus moves along the route that has sections without catenary and sections with catenary for one return trip.

The obtained mathematical model of the traction battery energy intensity allows vehicle manufacturers to substantiate the energy intensity of the traction battery of an autonomous trolleybus for route characteristics specified by the consumer, and for consumers (customers of transport services and transport enterprises) to determine the list of bus routes on which an autonomous trolleybus can be used. It

can be equipped with a traction battery with the energy intensity specified in its operational documentation, and a consumer is able to make a decision to use the trolleybus on other routes in case of a decrease in traction battery energy intensity in operation.

Further research in the direction of substantiating the traction battery capacity must be carried out in order to take into account the probabilistic characteristics of unit costs for an energy carrier, as well as average speed and vehicle mass.

KEYWORDS: BUS, TROLLEYBUS, ROUTE, CATENARY, AUTONOMOUS DRIVING, SPECIFIC INDICATOR, TRACTION BATTERY.

РЕФЕРАТ

Андрусенко С.И. Математическая модель энергетической емкости тяговой аккумуляторной батареи / С.И. Андрусенко, В.Б. Будниченко, В.С. Подписнов // Вестник Национального транспортного университета. Серия «Технические науки». Научно-технический сборник. – К.: НТУ, 2021. – Вып. 3 (50).

В статье изложена методология определения энергетической емкости тяговой аккумуляторной батареи (ТАБ) колесных транспортных средств, предназначенных для городских перевозок пассажиров, проанализированы факторы, влияющие на энергетическую емкость тяговой аккумуляторной батареи, и разработана ее математическую модель.

Объект исследования – тяговая аккумуляторная батарея как накопитель электроэнергии для движения троллейбуса с автономным ходом (ТАХ) на участках маршрута, где отсутствует контактная сеть.

Цель работы – разработка метода определения энергетических характеристик тяговой аккумуляторной батареи как энергонакопителя в зависимости от условий движения на автобусном маршруте для обоснования возможности замены автобуса на троллейбус с автономным ходом.

Методы исследования – аналитические и математические.

Анализ транспортной инфраструктуры городов Украины, где одновременно функционируют автобусный и троллейбусный транспорт, показал, что во многих случаях существуют автобусные маршруты, на отдельных участках которых установлена контактная троллейбусная сеть. В таком случае возникает вопрос целесообразности замены автобуса троллейбусом с автономным ходом, что не требует дополнительных капитальных вложений для обустройства контактной сети на участках автобусного маршрута, где она отсутствует, благодаря использованию троллейбусов с автономным ходом. При этом, решение вопроса целесообразности применения таких троллейбусов вместо автобусов ставит первоочередной задачей разработки метода обоснования энергетических характеристик тяговой аккумуляторной батареи как накопителя электрической энергии в зависимости от условий движения на автобусном маршруте.

Рассмотрены и проанализированы состояния (зарядка и разрядка), в которых находится тяговая аккумуляторная батарея во время движения троллейбуса на автобусном маршруте, при этом, во время движения по участку, где отсутствует контактная сеть, ТАБ теряет часть своей емкости величиной C_p , а во время движения по участку, где имеется контактная сеть, она получит часть потерянной емкости C_3 . Рассматривается случай, когда $C_p > C_3$, что является наиболее вероятной ситуацией на практике.

Приведены формулы для определения минимальной энергетической емкости ТАБ, которую надо установить на ТАХ, с учетом разницы между энергией, полученной от ТАБ, и энергией, полученной от зарядного устройства во время движения троллейбуса на маршруте, имеющем участки без контактной сети и участки с контактной сетью, за один оборотный рейс.

Полученная математическая модель энергетической емкости тяговой аккумуляторной батареи позволяет производителям транспортных средств выполнить обоснование энергетической емкости тяговой аккумуляторной батареи для троллейбуса с автономным ходом для заданных потребителем характеристик маршрута, а потребителям (заказчикам транспортных услуг и предприятиям-перевозчикам) – определить перечень автобусных маршрутов, где можно применить троллейбус с автономным ходом, имеющий тяговую аккумуляторную батарею с энергетической емкостью, указанной в его эксплуатационных документах, и принять решение о применении троллейбуса на других маршрутах, в случае уменьшения энергетической емкости тяговой аккумуляторной батареи в эксплуатации.

Дальнейшие исследования в направлении обоснования емкости тяговой аккумуляторной батареи должны выполняться с целью учета вероятностных характеристик удельных затрат энергоносителя, средней скорости движения и массы транспортного средства.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: АВТОБУС, ТРОЛЛЕЙБУС, МАРШРУТ, КОНТАКТНАЯ СЕТЬ, АВТОНОМНЫЙ ХОД, УДЕЛЬНЫЙ ПОКАЗАТЕЛЬ, ТЯГОВАЯ АККУМУЛЯТОРНАЯ БАТАРЕЯ.

АВТОРИ:

Андрусенко Сергій Іванович, кандидат технічних наук, професор, Національний транспортний університет, завідувач кафедри технічної експлуатації автомобілів та автосервісу, e-mail: sergeandrusenko@gmail.com, тел. +380634720587, Україна, 01010, м. Київ, вул. М. Омеляновича-Павленка, 1, к. 410А, orcid.org/0000-0002-9914-0200.

Будниченко Валерій Борисович, кандидат технічних наук, доцент, Національний транспортний університет, доцент кафедри технічної експлуатації автомобілів та автосервісу, e-mail: budnjb@i.ua, тел. +380679318431, Україна, 01010, м. Київ, вул. М. Омеляновича-Павленка, 1, к. 410, orcid.org/0000-0002-1235-3781.

Подписнов Владислав Сергійович, Національний транспортний університет, асистент кафедри технічної експлуатації автомобілів та автосервісу, e-mail: vpodpisnov@ukr.net, тел. +380989623871, Україна, 01010, м. Київ, вул. М. Омеляновича-Павленка, 1, к. 410, orcid.org/0000-0002-8583-1502.

AUTHOR:

Andrusenko Serhii I., Ph.D. in Technical Science, Professor, National Transport University, Head of the Department of Motor Vehicle Maintenance and Service, e-mail: sergeandrusenko@gmail.com, tel. +380634720587, Ukraine, 01010, Kyiv, M. Omelianovych-Pavlenko str. 1, of. 410A, orcid.org/0000-0002-9914-0200.

Budnychenko Valerii B., Ph.D. in Technical Science, Associate Professor, National Transport University, Associate Professor of the Department of Motor Vehicle Maintenance and Service, e-mail: budnjb@i.ua, tel. +380679318431, Ukraine, 01010, Kyiv, M. Omelianovych-Pavlenko str. 1, of. 410, orcid.org/0000-0002-1235-3781.

Podpisnov Vladyslav S., National Transport University, Assistant Lecturer of the Department of Motor Vehicle Maintenance and Service, e-mail: vpodpisnov@ukr.net, tel. +380989623871, Ukraine, 01010, Kyiv, M. Omelianovych-Pavlenko str. 1, of. 410, orcid.org/0000-0002-8583-1502.

АВТОРЫ:

Андрусенко Сергей Иванович, кандидат технических наук, профессор, Национальный транспортный университет, заведующий кафедрой технической эксплуатации автомобилей и автосервиса, e-mail: sergeandrusenko@gmail.com, тел. +380634720587, Украина, 01010, г. Киев, ул. М. Омеляновича-Павленко, 1, к. 410А, orcid.org/0000-0002-9914-0200.

Будниченко Валерий Борисович, кандидат технических наук, доцент, Национальный транспортный университет, доцент кафедры технической эксплуатации автомобилей и автосервиса, e-mail: budnjb@i.ua, тел. +380679318431, Украина, 01010, г. Киев, ул. М. Омеляновича-Павленко, 1, к. 410, orcid.org/0000-0002-1235-3781.

Подписнов Владислав Сергеевич, Национальный транспортный университет, ассистент кафедры технической эксплуатации автомобилей и автосервиса, e-mail: vpodpisnov@ukr.net, тел. +380989623871, Украина, 01010, г. Киев, ул. М. Омеляновича-Павленко, 1, к. 410, orcid.org/0000-0002-8583-1502.

РЕЦЕНЗЕНТИ:

Вірченко В.В., Корпорація підприємств міського електротранспорту України «Укрелектротранс», генеральний директор, Київ, Україна.

Гришук О.К., кандидат технічних наук, професор, Національний транспортний університет, проректор з навчальної роботи, Київ, Україна.

REVIEWER:

Virchenko V.V., Corporation of City Electric Transport Enterprises of Ukraine «Ukrelektrotrans», CEO, Kyiv, Ukraine.

Hryshchuk O.K., Ph.D. in Technical Sciences, Professor, National Transport University, Vice Rector for Academic Affairs, Kyiv, Ukraine.