

**Клепиков Володимир Борисович**, доктор технічних наук, професор, Тел. +380506478170, E-mail: [klepikovvladimir390@gmail.com](mailto:klepikovvladimir390@gmail.com).

**Собченко Віталій Вікторович**, аспірант, Тел. +380973904214, E-mail: [vitalii.sobchenko@ieee.khpi.edu.ua](mailto:vitalii.sobchenko@ieee.khpi.edu.ua). Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», вул. Кирпичова 2, м. Харків, 61002

## ЕНЕРГЕТИЧНІ, НАУКОВО-ТЕХНІЧНІ ТА ЕКОНОМІЧНІ АСПЕКТИ СТВОРЕННЯ ЕЛЕКТРОПРИВОДА ТРОЛЕЙБУСА З ГІБРИДНИМ ДЖЕРЕЛОМ ЖИВЛЕННЯ

*Анотація.* Надані переваги використання в міському електротранспорті троллейбусів з автономним рухом і вказано на доцільність поширення їх впровадження в Україні, враховуючи воєнні і економічні обставини. Обґрунтовано функціональну схему електроприводу з гібридним джерелом електроживлення, що містить акумуляторну і суперконденсаторну батареї та створює умови рекуперації енергії в гальмівних режимах і дозволяє здійснювати просту модернізацію існуючого електроприводу. Виведені співвідношення для розрахунку ємності суперконденсаторної батареї. Запропоновано методіку та вказано особливості вибору параметрів акумуляторної та суперконденсаторної батарей. Вказано, що запропоноване технічне рішення сприяє підвищенню пожежної безпеки за рахунок поліпшення теплового режиму акумуляторної батареї.

*Ключові слова:* електропривід троллейбуса, автономний хід, акумуляторна батарея, суперконденсаторна батарея, модернізація, фінансові витрати.

**Klepikov Volodymyr**, Doctor of Technical Sciences, Professor, Tel. +380506478170, E-mail: [klepikovvladimir390@gmail.com](mailto:klepikovvladimir390@gmail.com).

**Sobchenko Vitalii**, postgraduate, Tel. +380973904214, E-mail: [vitalii.sobchenko@ieee.khpi.edu.ua](mailto:vitalii.sobchenko@ieee.khpi.edu.ua)

## ENERGY SCIENTIFIC TECHNICAL AND ECONOMIC ASPECTS OF CREATING A TROLLEYBUS ELECTRIC DRIVE WITH A HYBRID POWER SOURCE

*Abstract.* The advantages of using autonomous trolleybuses in urban electric transport are presented and the expediency of their introduction in Ukraine is indicated, taking into account military and economic circumstances. The functional diagram of the electric drive with a hybrid power source, which contains a battery and a supercapacitor battery and creates conditions for energy recovery in braking modes and allows for simple modernization of the existing electric drive, is substantiated. The relations for calculating the capacity of the supercapacitor battery are derived. A methodology is proposed and the peculiarities of choosing the parameters of the battery and supercapacitor batteries are indicated. It is indicated that the proposed technical solution contributes to improving fire safety by improving the thermal regime of the battery.

*Keywords:* trolleybus electric drive, autonomous running, storage battery, supercapacitor battery, modernization, financial costs.

**Вступ.** Забруднення атмосфери багатьох великих міст від вихлопних газів автомобілів у літній період досягає меж, що перевищують допустимі норми. Цим пояснюється стійка тенденція заміни транспортних засобів з двигунами

внутрішнього згорання (ДВЗ) на засоби з електричним приводом. Вже зараз багато країн ухвалили рішення про частковий або повний перехід від автомобілів із двигуном (ДВЗ) на електромобілі з електроприводом [1]. Але така заміна викликає нові проблеми. При загальному збільшенні чисельності автотранспорту має місце збільшення виникнення транспортних заторів, зниження швидкості руху загального трафіку, нестача місць для паркування тощо. Одним із засобів вирішення вищевказаних проблем є розвиток міського електротранспорту, зокрема, тролейбусного, живлення енергією якого здійснюється звичайно від контактної мережі (КМ). В останні роки поширився випуск тролейбусів з автономним ходом (АХ) [2]. Електроживлення таких тролейбусів здійснюється від контактної мережі лише до того місця, до якого вона проведена (зазвичай це віддалені точки міст). Прискорена забудова міських околиць не завжди дає змогу своєчасно продовжити КМ, а іноді це може бути недоцільно. Тролейбус з АХ дає змогу здійснювати подальше транспортування пасажирів, забезпечивши електроживлення електроприводу (ЕП) від автономного джерела електроенергії, як правило, акумуляторних батарей (АКБ). Ємність АКБ має бути достатньою, щоб забезпечити повернення тролейбуса до лінії КМ.

В умовах, що склалися внаслідок воєнних дій в Україні, при великому обсязі відновлювальних робіт інфраструктури, використання тролейбусів з автономним ходом може бути досить актуальним. Передумовами цього є:

- незрівнянно менші витрати на переобладнання тролейбусів у тролейбуси з АХ порівняно зі створенням контактної мережі;
- збереження великої частини силового електрообладнання наявного електроприводу і як наслідок відносно малі затрати часу на модернізацію;
- можливість використання для розв'язання завдань логістики розташування ділянок автономного ходу в приміській зоні та на околицях великих міст.

**Мета роботи.** Проаналізувати різні аспекти створення електроприводу як найважливішої складової частини тролейбуса з автономним ходом. Визначити шляхи підвищення його енергоефективності, обґрунтувати функціональну схему

електроприводу, встановити проблемні питання його створення та впровадження. Розглянути доцільність використання суперконденсаторної батареї у складі автономного джерела електроживлення та запропонувати методику її розрахунку та вибору.

**Основна частина.** Оцінимо доцільність використання тролейбуса з АХ замість продовження лінії КМ. Контактна мережа являє собою сукупність пристроїв, що містять контактні дроти, опори й опорні конструкції, живильні кабельні лінії, заземлювальні пристрої та додаткові елементи, пов'язані з передачею електроенергії від тягових підстанцій [3]. Живильні кабельні лінії необхідні для забезпечення рівномірного розподілу напруги і для підтримки її номінального значення на всій ділянці мережі вздовж проходження тролейбуса. В Україні за Правилами експлуатації трамвая і тролейбуса допускається зміна напруги в робочому режимі в межах 600-700 В, а на струмоприймачах рухомого складу від 400 В до 700 В (у режимі рекуперації до 720 В). Середні втрати напруги допускаються в межах 15%, а у вимушених режимах (вихід з ладу одного з основних елементів системи зі збереженням здатності до подальшого руху транспортного засобу) - до 170 В.

Оцінку витрат на будівництво нової тролейбусної лінії зробимо, виходячи з даних проекту "Міський громадський транспорт в Україні". Наприклад, заплановане будівництво нових тролейбусних ліній у Львові протяжністю 5,6 км потребуватиме 3500 тис. євро, у Луцьку 2,15 км (разом із заміною поворотних стрілок) - 333,11 тис., а в Івано-Франківську - на 3,3 км витрати становитимуть 1200 тис. євро [4], тобто загалом близько 5000 тис. євро на 11 км ліній контактної мережі. Виходячи з вищенаведеного, вартість будівництва 1 км тролейбусної лінії становить не менше 450 тис. євро [5].

Відомі кілька видів тролейбусів з автономним ходом залежно від запасу ходу і способу підзарядки тягової акумуляторної батареї: запас ходу до 2 км і зі збільшеним запасом ходу 5-150 км, які використовують кілька способів підзарядки [6]:

- у нічний час (overnight charging) у депо (ще відомий як електробус) з найбільшим запасом ходу до 150 км;
- з підзарядкою на зупинках (opportunity charger) високими струмами для швидкого заряду, при цьому потрібно 5-20 хвилин простою і забезпечується запас ходу - від 20 до 70 км;
- з підзарядкою в русі (in-motion charging) від контактної мережі, запас ходу - від 5 км до 50-70 км.

Тобто електропривод тролейбуса з АХ в змозі забезпечити досить широкий діапазон відстані з перевезення пасажирів без продовження контактної мережі.

Продовження тролейбусних маршрутів без додаткової побудови контактної мережі можливо здійснювати шляхом модернізації тролейбусів, що вже експлуатуються у міських парках, враховуючи, що при цьому зберігається механічна частина електроприводу. Найважливішим елементом тролейбуса, що забезпечує живлення електроприводу на ділянках автономного ходу, є джерело електроживлення у вигляді акумуляторної батареї. Оцінимо економічну доцільність використання тролейбуса з АХ у зіставленні з продовженням маршруту шляхом будівництва контактної мережі.

Існують різні типи акумуляторів: нікель-кадмієві (NiCd), літій-залізо-фосфатні (LiFePO<sub>4</sub>), літій-іонні (Li-Ion), гелеві (VRLA) тощо. У роботі [7] зазначено, що модернізація тролейбуса на базі моделі T19102 без автономного ходу для роботи від АКБ (необхідною ємністю для забезпечення запасу ходу в 20 км) обійдеться в 10-15% від вартості звичайного тролейбуса, що становить приблизно 26,4 тис. євро. На підставі результатів тендерів системи «Прозоро» в різних містах України за 2016-2022 роки відмінність у ціні під час реалізації класичного тролейбуса і з автономним ходом становить 40-100% [2], [7], що наводить на припущення про завищення цін виробниками. Нехай модернізація призведе до додаткових витрат у 15%, тобто становитиме, при ціні тролейбуса у 285 тис. євро (тролейбус PTS T12309) [8] 43 тис. євро. У зіставленні з витратами на будівництво КМ при подовженні маршруту на 10 км, що становить 4,5 млн євро, модернізація

десяти тролейбусів на маршруті обійдеться в більш ніж 10 разів дешевше, тобто 430 тис. євро. Якщо виходити з того, що термін служби АКБ становить 4 роки, то мине щонайменше 40 років, перш ніж витрати на систему автономного ходу зрівняються з витратами на побудову лінії контактної мережі. Вищевказаний факт свідчить про досить високу економічну доцільність використання тролейбусів з автономним ходом.

Розглянемо можливості підвищення техніко-економічних показників електроприводу тролейбуса з (АХ) і для цього вкажемо на деякі недоліки тролейбусів з (АХ), що на даний час знаходяться в експлуатації:

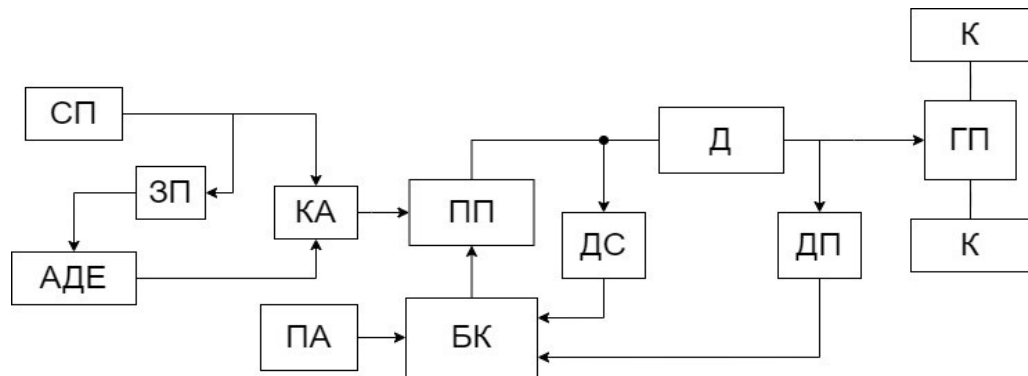
- оскільки в гальмівних режимах при автономному русі акумуляторна батарея не здатна приймати великі гальмівні струми, рекуперативні режими неможливі і енергія гальмування марно розсіюється на баластному резисторі
- внаслідок порушень теплових режимів АБ відомі випадки пожеж тролейбусів
- бажано також збільшити термін служби коштовних літєвих акумуляторних батарей.

В даній роботі пропонується живлення електроприводу під час автономного руху здійснювати від гібридного джерела електроенергії (АДЕ), яке крім акумуляторної батареї містить й суперконденсаторну (АБ-СКБ).

Функціональна схеми ЕП тролейбуса (Мал. 1) передбачає збереження основних складових частин наявних тролейбусів, що живляться від КМ, оскільки значну частину маршруту живлення відбувається саме від неї і це створює можливість модернізації наявного електроприводу, додаванням лише необхідного для реалізації автономного ходу обладнання.

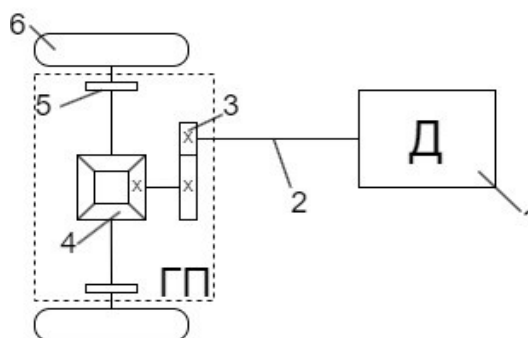
У даній схемі СП - струмоприймач, через який постійна напруга контактної мережі передається на комутуючу апаратуру КА, що підключає напівпровідниковий перетворювач ПП і зарядний пристрій ЗП. Зарядний пристрій ЗП необхідний для заряду автономного джерела електроенергії АДЕ від контактної мережі, щоб у подальшому використовувати його енергію під час автономного ходу. За допомогою КА можливо переключити електроживлення

напівпровідникового перетворювача ПП від КМ на АДЕ і навпаки. При живленні від АДЕ струмоприймачі мають бути опущені.



Мал. 1 - Функціональна схема електроприводу тролейбуса з автономним ходом

Напруга, що підводиться до напівпровідникового перетворювача ПП, методом широко-імпульсної модуляції (ШІМ) перетворюється до потрібного значення та форми, необхідної для електродвигуна Д. Датчиком струму ДС створюється зворотний зв'язок за струмом для блока керування БК. Зворотний зв'язок за швидкістю реалізується за допомогою датчика положення ДП, наприклад, енкодера. Педаллю акселератора ПА водій задає необхідне значення моменту, створює необхідне прискорення і керує швидкістю руху тролейбуса. Цей сигнал від ПА є задаючим для блока управління. На підставі отриманих сигналів завдання, сигналу від датчика струму ДС і датчика положення ДП, формується напруга керування для ПП. Кінематична схема головної передачі ГП представлена на Мал.2.

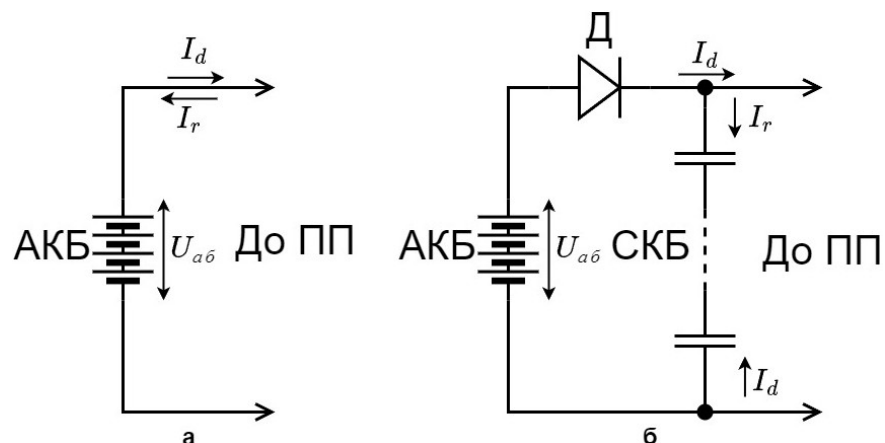


Мал. 2 - Спрощена кінематична схема трансмісії тролейбуса

Утворювальний електродвигуном 1 момент передається через карданний вал 2 на головну тягову передачу ГП, що складається з центрального редуктора 3,

диференціала 4 і колісних передач 5, розміщених у ступицях коліс 6 [9]. На колесах створюється тягове зусилля, яке, долаючи зовнішні сили опору, що діють на тролейбус, приводить його в рух. У сучасних тролейбусах набули найбільшого поширення електродвигуни асинхронного типу (АД). Для живлення АД змінним струмом використовується інвертор, що перетворює постійну напругу від джерела електроживлення. Керування режимом руху здійснюється за допомогою блока керування БК, який реалізується на базі мікропроцесора.

Під час гальмування тролейбуса можлива реалізація рекуперативних режимів, за яких набута тролейбусом кінетична енергія перетворюється електродвигуном на електромагнітну і повертається в АДЕ [10], [11]. Джерело електроживлення у вигляді гібридного за системою (АКБ-СКБ) завдяки суперконденсаторній батареї має здатність приймати струми заряду до 1 кА і більше і віддавати накопичену енергію під час наступних прискорень. Ємність одного елемента суперконденсаторної батареї достатньо висока і доходить до декількох тисяч фарад при напрузі елемента близько 2,85 В[12]. Завдяки цьому, будучи зібраними послідовно до значень, які становлять 10-100В, ємність такої батареї залишається доволі значною. Розглянемо вплив СКБ на властивості джерела електроживлення під час використання його в електроприводі тролейбуса з автономним ходом, на прикладі схем джерела, представлених на Мал. 3(а) і Мал. 3(б).



Мал. 3 - Схеми джерела живлення: а - АКБ, б - АКБ-СКБ.

У двигуному режимі від джерела живлення надходить струм  $I_d$ , при цьому напруга на СКБ дорівнює напрузі АКБ  $U_{aб}$ .

Тролейбус, що рухається зі швидкістю  $V_0$ , має кінематичну енергію:

$$W_k = \frac{1}{2} m_\Sigma V_0^2, \quad (1)$$

де  $m_\Sigma = m_{mp} + \sum_i^n J_i'$  - повна приведена до поступальної швидкості маса, що дорівнює сумі мас тролейбуса з пасажирями та наведених мас  $J_i$  обертових частин електропривода і коліс, що обертаються.

З урахуванням втрат, енергія, що рекуперується при гальмуванні, дорівнює:

$$W_r = k_n W_k, \quad (2)$$

де  $k_n$  – коефіцієнт рекуперації  $k_n < 1$ .

Ця енергія у вигляді енергії електричного поля буде накопичена в СКБ:

$$W_r = C \frac{U_c^2 - U_{ab}^2}{2}, \quad (3)$$

де  $C$  – ємність СКБ,  $U_c$  – напруга СКБ.

Під час подальшого прискорення накопичена енергія спочатку віддається суперконденсаторною батареєю доти, доки напруга на ній не стане дорівнювати  $U_{ab}$ , після чого подальше живлення здійснюється від АКБ.

Якби АКБ мала можливість приймати рекуперовану енергію то струм  $I_r$ , що забезпечує прийом і віддачу енергії  $W_r$ , двічі протікаючи через СКБ, відповідно розвантажував при цьому акумуляторну батарею. Якщо в циклічному режимі прийняти енергію, що віддається АКБ під час розгону до швидкості  $V_0$ , рівною  $W_d$ , то коефіцієнт збільшення потоку енергії через АКБ за схемою Мал. 3(а) у порівнянні зі схемою Мал. 3(б) становить:

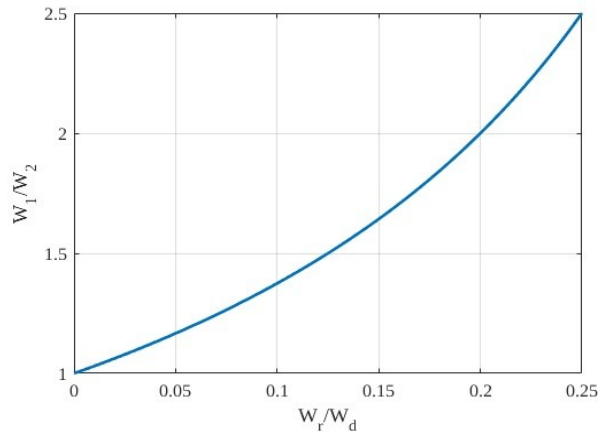
$$K = \frac{W_d + W_r}{W_d - 2W_r} = \frac{1 + K_w}{1 - 2K_w}, \quad (4)$$

де  $K_w = W_r / W_d$  - коефіцієнт пропорційності рекуперованої енергії до енергії, що віддається в двигуному режимі. Графічну залежність співвідношення (4) представлено на Мал. 4[11].

З графіку видно, що виконання джерела електроживлення у вигляді АКБ і СКБ покращує тепловий режим АКБ, що сприяє збільшенню терміну її служби. Але



встановлення СКБ потребуватиме додаткових витрат. Визначимо співвідношення для розрахунку і вибору АКБ та СКБ.



Мал. 4 - Коефіцієнт збільшення потоку енергії через АКБ, де  $W_1/W_2 = K$

Ємність СКБ обираємо з умови, що під час гальмування з найбільшою швидкістю руху  $V_m$  і найбільшим значенням рекуперованої енергії  $W_{pm}$ , напруга на СКБ  $U_{cm}$  не перевищила номінальну напругу ЕД  $U_n$ . Для того щоб СКБ приймало енергію рекуперації, напруга АКБ  $U_{a\delta}$  має бути меншою. Тоді:

$$W_{pm} = C \frac{U_n^2 - U_{a\delta}^2}{2} = CU_{a\delta}^2 \frac{(U_n/U_{a\delta})^2 - 1}{2} \quad (5)$$

або

$$W_{pm} = C \frac{U_n^2 - U_{a\delta}^2}{2} = CU_n^2 \frac{1 - (U_{a\delta}/U_n)^2}{2}. \quad (6)$$

Так як

$$W_{pm} = k_n \frac{m_{\Sigma} V_{Am}^2}{2}, \quad (7)$$

то максимальна швидкість  $V_{Am}$  має бути нижчою, ніж максимальна швидкість класичного тролейбуса  $V_m$ , пропорційно має бути знижена і напруга живлення АКБ, тобто:

$$\frac{V_{Am}}{V_m} = \frac{U_{a\delta}}{U_n}, \quad (8)$$

звідки

$$U_{a\delta} = U_n \frac{V_{Am}}{V_m}, \quad (9)$$

$$V_{Am} = V_m \frac{U_{a\delta}}{U_n} \quad (10)$$

Зниження швидкості  $V_{Am}$  узгоджується з інколи виникаючим погіршенням стану дорожнього полотна на ділянці подовженого маршруту і технічним станом раніше використовуваних модернізованих тролейбусів.

Підставивши (10) у (7):

$$W_{pm} = k_n \frac{m_\Sigma}{2} \left( V_m \frac{U_{a\delta}}{U_n} \right)^2, \quad (11)$$

а потім (11) в (5)

$$k_n \frac{m_\Sigma}{2} \left( V_m \frac{U_{a\delta}}{U_n} \right)^2 = CU_{a\delta}^2 \frac{(U_n/U_{a\delta})^2 - 1}{2}, \quad (12)$$

отримаємо відношення:

$$k_n m_\Sigma V_m^2 \frac{U_{a\delta}^2}{U_n^2} = CU_{a\delta}^2 ((U_n/U_{a\delta})^2 - 1) \quad (13)$$

або

$$k_n m_\Sigma V_m^2 = CU_n^2 ((U_n/U_{a\delta})^2 - 1). \quad (14)$$

При напрузі одного елемента суперконденсаторної батареї  $U_{C1}$ , ємність якого дорівнює  $C_1$ , необхідна кількість елементів дорівнює:

$$n_c = \frac{U_n}{U_{C1}}. \quad (15)$$

При цьому ємність суперконденсаторної батареї дорівнює:

$$C = \frac{C_1}{n_c}. \quad (16)$$

З огляду на дискретність набору елементів СКБ, з умови недопущення  $U_n$  менше заданого значення, визначаємо число елементів:

$$n_c > \frac{U_n}{U_{C1}}. \quad (17)$$

При цьому ємність СКБ відповідно до (14) має бути визначена за співвідношенням:

$$C > \frac{k_n m_\Sigma V_m^2}{((U_n/U_{a\delta})^2 - 1)}. \quad (18)$$

У разі невиконання співвідношення (18) необхідно знизити значення  $U_{a\delta}$  або збільшити число паралельних гілок. Наведемо методику розрахунку на прикладі тролейбусу PTS-12, який має такі характеристики [13]:  $m_\Sigma = 18000$  кг,  $V_m = 60$  км/год = 16.67 м/с,  $U_n = 594$  В. Коефіцієнт рекуперації  $k_n$  приймемо рівним 0.65. Приймемо, що набір СКБ робимо з суперконденсаторних модулів фірми Maxwell з ємністю  $C_1 = 160$  Ф і напругою  $U_{C1} = 48$  В [14].

Підставивши вищенаведені дані в (15), визначаємо кількість суперконденсаторних модулів  $n_C = 12.38$  шт. Тобто 13 шт послідовно підключених модулів, що витримують напругу 624 В із загальною ємністю  $C = 12.69$  Ф.

Задавшись попереднім значенням максимальної швидкості тролейбуса під час руху на автономному ході  $V_{Am}$ , за рівнянням (9) визначається попереднє значення напруги акумуляторної батареї. Ці значення підставляються у співвідношення (18), у разі невиконання якого з певним кроком знижується напруга  $U_{a\delta}$  і знову перевіряється на відповідність. Таким ітеративним шляхом визначається напруга АКБ і можлива максимальна швидкість тролейбуса на АХ.

За наведеними вище даними, використовуючи рівняння (9), (10) і (18), отримуємо напругу АКБ  $U_{a\delta} = 450$  В і максимальну швидкість автономного ходу  $V_{Am} = 45$  км/год.

Оцінимо, чи не виявиться, що введення в джерело електроживлення суперконденсаторної батареї для автономного ходу призведе до надмірного подорожчання модернізації електроприводу під час переобладнання тролейбуса на тролейбус з автономним ходом. Ціна одного суперконденсаторного модуля становить 1184.21 долара [15], тобто повністю зібрана СКБ коштує приблизно 15.4 тис. доларів, що згідно з курсом валют Центрального Європейського банку на 13.06.2023 р. становитиме близько 14.27 тис. євро [16]. Ця вартість не враховує додаткові витрати на корпус, провідники тощо, що навряд чи становитиме понад 1 тис. євро, отже, припустимо, що повна вартість СКБ близька до 15 тис. євро.

Збільшення витрат на СКБ з урахуванням раніше проведених розрахунків для модернізації десяти тролейбусів потребуватиме близько 580 тис. євро. Порівняно з фінансовими витратами на будівництво 10 км ліній контактної мережі це обійдеться в більш ніж 7 разів менше. Навіть прийнявши коефіцієнт запасу для розрахункових значень об'єму і маси суперконденсаторної батареї рівним 1.3 отримаємо такі значення: об'єм - менше ніж  $0.25 \text{ м}^3$ , маса - близько 230 кг, що видається для тролейбусів цілком прийнятним.

Повернення енергії джерелу електроживлення в тролейбусі з автономним ходом можливе не тільки в рекуперативних режимах гальмування при зниженні швидкості руху. Рекуперация може здійснюватися і під час руху з незмінною швидкістю, якщо тролейбус здійснює рух при спуску з височини. У цьому випадку, в енергію, яку приймає суперконденсаторна батарея, перетворюється потенційна, яка пропорційна перепаду висот на початку спуску  $h_1$  і в кінці  $h_2$ :

$$W_n = mg(h_1 - h_2). \quad (19)$$

При цьому може скластися ситуація, коли внаслідок затяжного спуску з великим перепадом висот частка рекуперованої енергії:

$$W_{pc} = k_n W_n \quad (20)$$

стане достатньою великою, внаслідок чого напруга на СКБ перевершить номінальну напругу двигуна, що неприпустимо. При ємності СКБ, розрахованої за співвідношенням (18), щоб не допускати погашення надлишкової енергії на під'єднаний баластний опір, що підключається в цьому випадку, слід розрахувати ємність СКБ зі співвідношення:

$$C \geq 2k_n \frac{mg(h_1 - h_2)}{U_n^2}. \quad (21)$$

Цей факт свідчить про необхідність вивчення рельєфу дороги під час визначення значення ємності суперконденсаторної батареї.

На величину коефіцієнта рекуперации  $k_n$  впливає сила опору руху, яка містить складову, пропорційну квадрату швидкості руху. Методика врахування сил опору

руху стосовно електромобіля для типового міського циклу ЕСЕ-15 наведена в роботі [11].

### Висновки.

1. Аналіз запропонованої функціональної схеми електроприводу показує, що порівняно з традиційним електроприводом, її відмінністю є лише наявність автономного джерела електроживлення. Це створює передумови для модернізації електроприводу наявних троллейбусів зі збереженням їхніх основних силових компонентів.
2. Модернізація для троллейбуса з автономним ходом вимагає незрівнянно менших фінансових витрат і часу порівняно з будівництвом контактної мережі, необхідної для продовження наявного маршруту.
3. Для України, в умовах воєнного часу і повоєнного відновлення інфраструктури міст з урахуванням фінансових обмежень, логістичного і часового чинників, розширення парку троллейбусів з автономним ходом видається актуальним.
4. Використання гібридного автономного джерела електроживлення у вигляді поєднання акумуляторної та суперконденсаторної батареї створює можливість підвищення енергоефективності електроприводу та поліпшення теплового режиму літій-іонних акумуляторів.

### Список використаної літератури:

1. IEA (2020), Global EV Outlook 2020, IEA, Paris. URL: <https://www.iea.org/reports/global-ev-outlook-2020>
2. Поставки троллейбусов в Украине: заказчики, поставщики, цены. Закупка новых троллейбусов через тендеры в «Прозорро». [Online]. Available: <https://traffic.od.ua/blogs/antonlyagushkin/1218483>
3. Афанасьев А.С. Контактные сети трамвая и троллейбуса. М.: «ТРАНСПОРТ». 1988, 262с.
4. Проект «Міський громадський транспорт в Україні». URL: <https://mtu.gov.ua/news/27947.html>
5. Собченко В. В. До створення троллейбуса з автономним ходом. Теоретичні та практичні дослідження молодих вчених : зб. тез доп. 16-ї Міжнар. наук.-практ. конф. магістрантів та аспірантів, 14-16 грудня 2022 р. Нац. техн. ун-т "Харків. політехн. ін-т" [та ін.]. – Харків : НТУ "ХПИ", 2022. – С. 147.
6. F. Bergk and R. Pütz, "Potential of In-Motion Charging Buses for the Electrification of Urban Bus Lines Konferencja", Electromobility in public transport Gdynia, 9 2016.
7. Voytkiv, S. (2022) Economic and social aspects of development and application of trolleybuses with autonomous running in Ukraine. Socio-Economic Problems and the State (electronic journal), Vol. 27, no. 2, pp. 3-14. URL: <http://sepd.tntu.edu.ua/images/stories/pdf/2022/22vsrvvu.pdf>
8. Тролейбуси нові. URL: <https://prozorro.gov.ua/tender/UA-2022-10-31-008681-a>
9. Богдан Н.В., Атаманов А.И., Сафонов А.И. Троллейбус. Теория, конструирование, расчет. Мн.: Ураджай, 1999. 347с.
10. Из опыта создания электропривода электромобиля с суперконденсаторным накопителем энергии / В. Б. Клепиков [и др.] // Вестник Нац. техн. ун-та "ХПИ" : сб. науч. тр. Темат. вып. : Проблемы автоматизированного электропривода. Теория и практика. – Харьков : НТУ "ХПИ". – 2015. – № 12 (1121). – С. 195-198.
11. V. Klepikov and A. Rotaru, "To use of supercapacitors in an electric vehicle's power supply," 2020 IEEE KhPI Week on Advanced Technology (KhPIWeek), Kharkiv, Ukraine, 2020, pp. 446-449, doi: 10.1109/KhPIWeek51551.2020.9250071.

12. Maxwell Technologies, "2.85V 3400F ULTRACAPACITOR CELL," BCAP3400P285K04/05 datasheet, Nov. 2022.
13. ТРОЛЕЙБУС PTS 12. URL: [https://ptsukraine.com /%D1%82%D1%80%D0%BE%D0%BB%D0%B5%D0%B9%D0%B1%D1%83%D1%81-PTS-12/](https://ptsukraine.com/%D1%82%D1%80%D0%BE%D0%BB%D0%B5%D0%B9%D0%B1%D1%83%D1%81-PTS-12/)
14. Maxwell Technologies, BMOD0165P048C0B datasheet. URL: [https://maxwell.com/wp-content/uploads/2023/02/3001491-EN.9\\_DS\\_48V-165F-C0B-BMOD0165-P048\\_20230116.pdf](https://maxwell.com/wp-content/uploads/2023/02/3001491-EN.9_DS_48V-165F-C0B-BMOD0165-P048_20230116.pdf)
15. BMOD0165P048C0B Supercapacitors/Ultracapacitors from Maxwell Technologies. URL: <https://shop.richardsonrfpd.com/Products/Product/BMOD0165P048C0B>
16. Euro foreign exchange reference rates. URL: [https://www.ecb.europa.eu/stats/policy\\_and\\_exchange\\_rates/euro\\_reference\\_exchange\\_rates/html/eurofxref-graph-usd.en.html](https://www.ecb.europa.eu/stats/policy_and_exchange_rates/euro_reference_exchange_rates/html/eurofxref-graph-usd.en.html)

### References:

1. IEA. (2020) Global EV Outlook 2020, IEA, Paris. Available at: <https://www.iea.org/reports/global-ev-outlook-2020>
2. A. Lyagushkin, D. Yankivsky. (2019, Sep.) Deliveries of trolleybuses in Ukraine: customers, suppliers, prices. Purchase of new trolleybuses through tenders at Prozorro, Available at: <https://traffic.od.ua/blogs/antonlyagushkin/1218483>
3. A. Afanasiev. Overhead contact system of tram and trolleybus. M.: Transport. pp. 262, 1988.
4. Project "Urban civil transport in Ukraine," Available at: <https://mtu.gov.ua/news/27947.html>
5. V. Sobchenko, "To the creation of a trolleybus with autonomous running". Theor. and practical researches of young scientists: collection of abstr. of the 16th International scientific and practical conf. of undergraduate and graduate students, Dec. 14-16, 2022. Kharkiv: NTU "KHPI", 2022, pp.147.
6. F. Bergk and R. Pütz, "Potential of In-Motion Charging Buses for the Electrification of Urban Bus Lines", Journal of Earth Sciences and Geotechnical Engineering, vol.6, no. 4, 2016, pp. 347-362.
7. S. Voytkiv. Economic and social aspects of development and application of trolleybuses with autonomous running in Ukraine. Socio-Economic Problems and the State (electronic journal), Vol. 27, no. 2, pp. 3-14. Available at: <http://sepd.tntu.edu.ua/images/stories/pdf/2022/22vsvrvu.pdf>
8. New trolleybuses. Available at: <https://prozorro.gov.ua/tender/UA-2022-10-31-008681-a>
9. H. Bogdan, A. Atamanov, A. Safonov. Trolleybus. Theory, design, calculations. Mn.: Urazhai. pp. 347, 1999..
10. V. Klepikov, A. Gonchar and A. Semikov, "From the experience of the creation of electric vehicle electric drive with supercapacitor energy storage", Vestnik NTU "KhPI", vol. 12, 2015, pp. 195-198.
11. V. Klepikov and A. Rotaru, "To use of supercapacitors in an electric vehicle's power supply, " 2020 IEEE KhPI Week on Advanced Technology (KhPIWeek), Kharkiv, Ukraine, 2020, pp. 446-449, doi: 10.1109/KhPIWeek51551.2020.9250071.
12. Maxwell Technologies, "2.85V 3400F ULTRACAPACITOR CELL, " BCAP3400P285K04/05 datasheet, Nov. 2022. Available at: [https://maxwell.com/wp-content/uploads/2022/11/3003475-EN.1\\_DS\\_2.85V-3400F-Cell-BCAP3400-P285.pdf](https://maxwell.com/wp-content/uploads/2022/11/3003475-EN.1_DS_2.85V-3400F-Cell-BCAP3400-P285.pdf)
13. Trolleybus PTS 12. Available at: <https://ptsukraine.com/%D1%82%D1%80%D0%BE%D0%BB%D0%B5%D0%B9%D0%B1%D1%83%D1%81-PTS-12/>
14. Maxwell Technologies, BMOD0165P048C0B datasheet. Available at: [https://maxwell.com/wp-content/uploads/2023/02/3001491-EN.9\\_DS\\_48V-165F-C0B-BMOD0165-P048\\_20230116.pdf](https://maxwell.com/wp-content/uploads/2023/02/3001491-EN.9_DS_48V-165F-C0B-BMOD0165-P048_20230116.pdf)
15. BMOD0165P048C0B Supercapacitors/Ultracapacitors from Maxwell Technologies. Available at: <https://shop.richardsonrfpd.com/Products/Product/BMOD0165P048C0B>
16. Euro foreign exchange reference rates. Available at: [https://www.ecb.europa.eu/stats/policy\\_and\\_exchange\\_rates/euro\\_reference\\_exchange\\_rates/html/eurofxref-graph-usd.en.html](https://www.ecb.europa.eu/stats/policy_and_exchange_rates/euro_reference_exchange_rates/html/eurofxref-graph-usd.en.html)

Надійшла до редакції 25.03.2024р.