

Комбінована система електроживлення тролейбуса та економічний ефект від її використання

Губка^f Є. О., ORCID [0000-0001-6247-869X](https://orcid.org/0000-0001-6247-869X)

Вербицький^s Є. В., к.т.н. доц., ORCID [0000-0001-7275-5152](https://orcid.org/0000-0001-7275-5152)

Національний технічний університет України

«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» kpi.ua

Київ, Україна

Анотація—Стаття присвячена розробці комбінованої системи електроживлення тролейбуса з високовольтним акумулятором, яка дозволяє даному транспортному засобу рухатися в режимі автономного ходу. Запропоновано структуру комбінованої системи електроживлення, розраховано ємність акумулятора та визначено його тип. Запропоновано новий спосіб відбирання енергії з використанням ємнісного накопичувача. Показано вплив затворів та аварій на прибуток тролейбусного маршруту. Пораховано загальний економічний ефект від використання запропонованої системи електроживлення та вказано її переваги порівняно з системою тролейбуса, який рухається виключно за рахунок напруги контактної мережі.

Ключові слова — тролейбус з високовольтним акумулятором; комбінована система електроживлення.

I. ВСТУП

Звичайний тролейбус має понижену мобільність через прив'язаність до напруги контактної мережі. В зв'язку з чим, навіть при нормальному режимі функціонування, вірогідність ускладнення курсування тролейбуса більша, ніж у звичайного транспорту, а у випадках зникнення напруги мережі через обledenіння ліній електропередач, їхній обрив, неструмлення тягових підстанцій, чи у разі виникнення несправностей тролейбуса його рух припиняється. Це є проблемою для функціонування даного маршруту, а також ускладнює пересування інших видів транспорту, оскільки зменшується кількість вільних смуг руху. Така затримка тролейбуса спричинить затори і ДТП, що призведе до недосягнення повної окупності маршруту тролейбуса та невиконання працівниками нормованого робочого графіку. До того ж, через жорстку прив'язку тролейбусів до ліній електропередач, що живлять його тягову систему, на неелектрифікованих ділянках курсують автобуси, від чого страждає екологія міста, окрім цього їх використання є значно дорожчим за використання тролейбуса.

Для підвищення мобільності тролейбусів доцільно використовувати високовольтні акумулятори замість низьковольтних, що встановлюються зараз. Такі акумулятори, окрім низьковольтної бортової апаратури, можуть живити тягову систему тролейбуса.

Метою статті є розробка комбінованої системи електроживлення тролейбуса з високовольтним акумулятором та дослідження економічного ефекту від її використання.

II. ПЕРЕВАГИ ТРОЛЕЙБУСА З ВИСОКОВОЛЬТНИМ АКУМУЛЯТОРОМ

Переваги тролейбуса з високовольтним акумулятором порівняно зі звичайним тролейбусом:

- менше навантаження на тягові підстанції через те, що під час розгону тролейбуса додаткова енергія береться з акумулятора, а під час гальмування енергія не передається в підстанцію, а накопичується в акумуляторі;
- можливість розширення мережі тролейбусів на ділянки з відсутньою лінією електропередач;
- вигреш в мобільності при заторах та ДТП;
- можливість об'їзду ділянки, де відбулися збої в електромережі;
- використовується наявна інфраструктура, при цьому тролейбус має можливість об'їжджати перепони та функціонувати навіть при обриві чи обledenінні контактних дротів, тобто при зупинці подачі на них напруги мережі;
- значна економія коштів у містах, економічний ефект якої продемонстровано на рис. 1, адже не потрібно протягувати нові мережі та будувати підстанції в місцях, де вони відсутні, тому що тролейбус з високовольтним акумулятором зможе подолати ці ділянки.



III. ОГЛЯД СХЕМИ ЕЛЕКТРИЧНОЇ СТРУКТУРНОЇ КОМБІНОВАНОЇ СИСТЕМИ ЕЛЕКТРОЖИВЛЕННЯ ТРОЛЕЙБУСА

На рис. 2 наведено структурну схему системи електроживлення звичайного тролейбуса.

Тролейбус має тягову установку (двигун), яка живиться від напруги мережі 400-800 В. Для живлення бортової апаратури напруга мережі понижується з допомогою перетворювача до величини 24 В. Для забезпечення функціонування бортової апаратури тролейбуса навіть у разі раптового зникнення напруги мережі (наприклад, штанги тролейбуса зійшли з дроздів) встановлено акумулятор [1-4].

Для модернізації тролейбуса пропонується наступна структурна схема системи електроживлення з високовольтним акумулятором, рис.3.

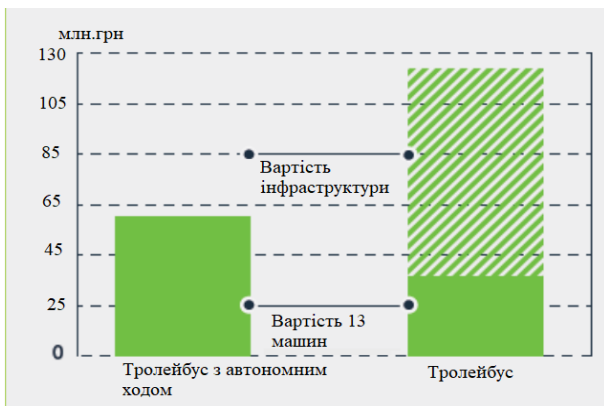


Рис. 1 Порівняння вартості тролейбуса з високовольтним акумулятором і звичайного тролейбуса



Рис. 2 Система електроживлення звичайного тролейбуса



Рис. 3 Комбінована система електроживлення тролейбуса з високовольтним акумулятором

Високовольтний акумулятор розрахований на напругу 600 В і слугує для живлення бортової апаратури та тягової установки тролейбуса у випадку зникнення напруги контактної мережі. Паралельно до акумулятора встановлена батарея суперконденсаторів, енергія якої може слугувати для підзарядки акумулятора в режимі автономного ходу тролейбуса [7-10]. Система керування призначена для керування перетворювачем напруги та зарядними пристроями акумулятора і батареї суперконденсаторів.

Перевагою цієї системи електроживлення є те, що частину маршруту тролейбус може пересуватися без напруги контактної мережі. На рис. 4 наведені часові діаграми роботи системи електроживлення тролейбуса. Часові діаграми роботи системи електроживлення двигуна демонструються на основі чотирьох основних режимів роботи тролейбуса, рис.4.а :

- плавний пуск двигуна, коли оберти двигуна плавно нарастають від нульового до максимального значення;
- рух з постійною швидкістю, коли кількість обертів двигуна є сталою;
- вибіг, коли з тягової системи знімається напруга живлення і транспортний засіб рухається по інерції;
- гальмування, коли на тяговій системі створюється електричне поле, яке гальмує двигун.

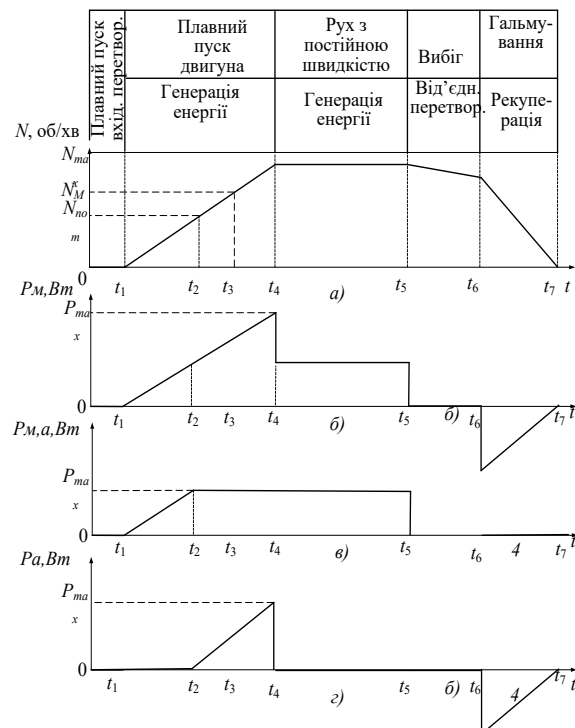


Рис. 4 : а - показана залежність кількості обертів двигуна від часу при різних режимах його роботи; б – потужність мережі без акумулятора при різних режимах роботи; в – потужність мережі з високовольтним акумулятором; г – потужність самого акумулятора.



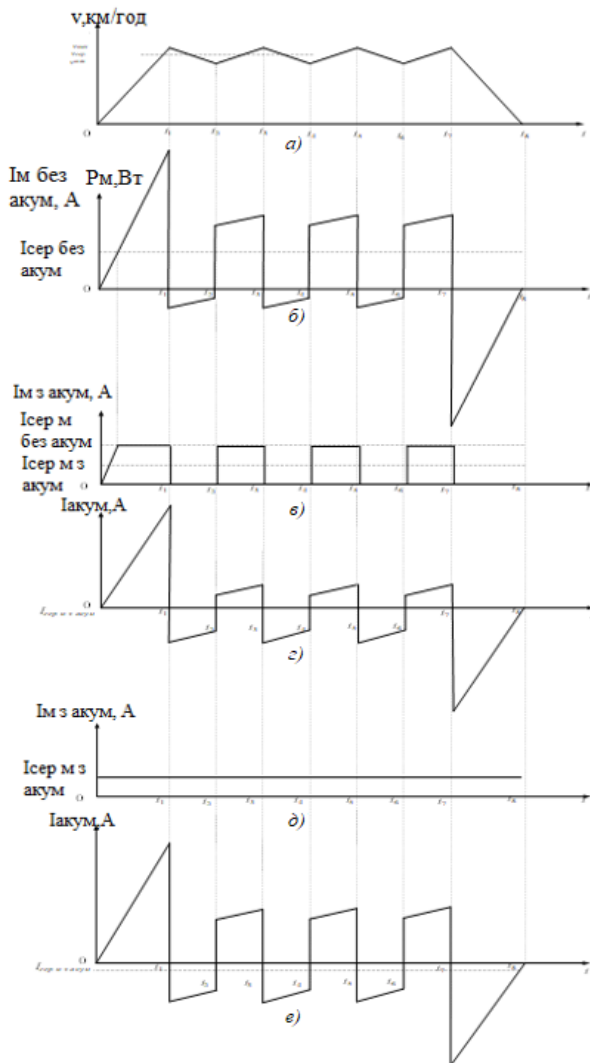


Рис. 5 Порівняння навантаження на тягові системи без накопичувача та з накопичувачем: а - залежність швидкості тролейбуса від часу; б - струм та потужність мережі без акумулятора; в - струм мережі з акумулятором при відбиранні від мережі постійного пульсуючого струму; г - струм акумулятора, що відповідає струму мережі на рис.5.в); д - струм мережі з акумулятором при відбиранні від мережі середнього струму; е - струм акумулятора, що відповідає струму мережі на рис.5.д).

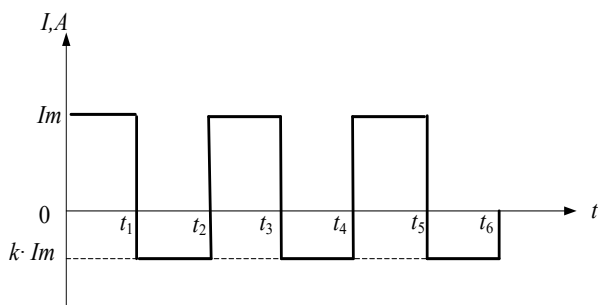


Рис. 6 Діаграма споживання струму

На рис.4.б наведена діаграма потужності, яка споживається двигуном від мережі без високовольтного акумулятора, на рис.4.в показана потужність, яка споживається від мережі транспортним засобом з висо-

ковольтним акумулятором; на рис.4.г наведена потужність, яка споживається і запасається в акумуляторі [5-8].

Основні відмінності тролейбуса з підвищеною мобільністю від звичайного тролейбуса:

- потужність, яка споживається від мережі, не перевищує номінальної потужності;
- енергія рекуперується не в мережу, а в акумулятор;
- піки споживання потужності і рекуперації здійснюються через акумулятор.
- Перевагами такої системи електроживлення, окрім автономного ходу, є:
- зменшення втрат при рекуперації і пікових навантажень та зменшення навантаження на тягові підстанції під час пікових навантажень;
- можливість рекуперувати енергію в мережах, де це є неможливим через особливості побудови підстанцій.

Зазвичай транспортний засіб рухається не з постійною швидкістю, а динамічно змінюючи її відносно середнього значення, рис.5.а). Тому під час руху можна виділити ділянки де енергія споживається і де рекуперується назад в мережу, Рис.5.б). При встановленні паралельно до тягової системи комбінованого накопичувача електроенергії рекуперації енергії під час руху доцільно проводити на цей накопичувач, що дозволяє зменшити втрати на рекуперацію і зменшити пікове навантаження на мережу, за рахунок того, що рекуперовану енергію можна використовувати для зменшення струму мережі під час прискорення, рис.5.в та рис.5.г. В результаті цього струм мережі буде мати імпульсний характер без від'ємних ділянок струму, а його амплітуда дещо зменшиться [9-11]. Подальше зменшення навантаження на мережу можливе, якщо струм від мережі буде відбиратись постійно і матиме постійне значення, рис.5.д, а змінну складову цього струму буде формувати ємнісний накопичувач, рис.5.е.

Можна оцінити зменшення втрат при використанні такого принципу відбирання енергії від мережі і ємнісного накопичувача енергії.

Будемо оцінювати втрати для випадку, коли тролейбус розігнався і рухається з приблизно сталою швидкістю. При цьому підтримання постійної швидкості відбувається за рахунок періодичного прискорення та гальмування [11, 12]. Тому даний процес руху тролейбуса можна описати з допомогою діаграми струму споживання, яка зображена на рис. 6.

На ділянці з додатнім струмом транспортний засіб прискорюється, а з від'ємним струмом гальмує. Варто зважити на те, що ділянка гальмування може бути різною, залежно від значення k , яке змінюється в діапазоні значень від 0 до 1. Нульовому значенню відповідає рух по інерції [13-16]. Зі зростанням значення k водій тролейбуса все більше гальмує і коли

воно досягне одиниці, то тролейбус повністю зупиниться. Після цього він знову продовжить рух.

При даному принципі відбирання енергії змінна складова відбирається від ємнісного накопичувача, вихідний опір якого є значно меншим за опір мережі, тому втрати при обміні енергією між накопичувачем та тяговою системою можна не брати до уваги [18-20]. В той же час є доцільним враховувати лише втрати при взятті енергії від мережі, яка має певний вихідний опір R_m .

При цьому зменшення втрат в даній системі визначається співвідношенням $I_0^2 R / I_{cp}^2 R$, де $I_0^2 R$ – це втрати при обміні енергією з мережею без накопичувача, а $I_{cp}^2 R$ – відповідно втрати при обміні енергією з мережею з накопичувачем.

Діюче значення струму:

$$I_0 = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T i^2 dt} = \sqrt{\frac{1}{T} \left(\int_0^{T/2} I_m^2 dt + \int_{T/2}^T I_m^2 k^2 dt \right)} = I_m \sqrt{\frac{1+k^2}{2}} \quad (1)$$

Середнє значення струму:

$$I_{cp} = \frac{1}{T} \int_0^T i dt = \frac{1}{T} \left(\int_0^{T/2} I_m dt - \int_{T/2}^T (-I_m k) dt \right) = I_m \left(\frac{1-k}{2} \right) \quad (2)$$

На рис.7 показано в скільки разів зменшаться втрати залежно від значення коефіцієнта k .

Таким чином наведений принцип відбирання енергії дозволяє зменшити втрати потужності щонайменше вдвічі.

IV. ВПЛИВ ЗАТОРІВ ТА АВАРІЙ НА ПРИБУТОК ТРОЛЕЙБУСА ТА ПРАЦІВНИКІВ, ЯКИХ ВІН ПЕРЕВОЗИТЬ

Головним недоліком звичайного тролейбуса є його прив'язаність до ліній електропередач. Якщо на його шляху будуть затори, станеться дорожньо-транспортна пригода чи обрив ліній електропередач, то він не зможе продовжити рух або якимось чином оминати дану ділянку. Це призведе до втрати часу, а отже й до зменшення прибутків як даного маршруту тролейбуса, так і людей, яких він перевозить, адже в такому випадку вони запізняться на роботу та недоотримають гроші, які б могли заробити за цей час у разі, якби прибули на роботу вчасно. З цими проблемами може впоратися тролейбус з підвищеною мобільністю [21]. Але задля оцінки доцільності його використання треба оцінити економічні втрати, які виникають в екстрених випадках у разі використання звичайного тролейбуса, зокрема як ці надзвичайні ситуації в результаті вплинуть на загальний прибуток маршруту, по якому курсує тролейбус, а також на прибуток людей, яких він перевозить даний тип транспортного засобу [23]. В цьому допоможе методика, наведена нижче. Оцінка проводиться по місту Києву.

Оцінимо вплив заторів та аварій на прибуток тролейбуса.

Прибуток тролейбуса за одиницю часу:

$$C_{од.часу} = \frac{C}{T}, \quad (3)$$

де C – прибуток за повне коло маршруту тролейбуса; T – тривалість маршруту тролейбуса.

Прибуток тролейбуса, враховуючи аварії:

$$C_{ав} = \frac{C \cdot T}{(T + T_{ав})}, \quad (4)$$

де $T_{ав}$ – тривалість аварії.

Прибуток тролейбуса враховуючи затори:

$$C_{зат} = C \cdot \frac{v_{сер.зат}}{v_{ном}}, \quad (5)$$

де $v_{сер.зат}$ – середня швидкість проходження тролейбусом маршруту в умовах затору; $v_{ном}$ – номінальна швидкість тролейбуса.

Оцінимо вплив заторів та аварій на прибуток тролейбуса за такою формулою:

$$F(T_{ав}, v_{сер.зат}) = \frac{T}{T + T_{ав}} \cdot \frac{v_{сер.зат}}{v_{ном}}, \quad (6)$$

де F – частка від максимального прибутку маршруту тролейбуса.

Прибуток працівника, якого перевозить тролейбус:

$$C_{пр} = C_{сер.хв} \cdot T, \quad (7)$$

де $C_{сер.хв}$ – середній прибуток працівника за хвилину; T – тривалість робочого дня працівника.

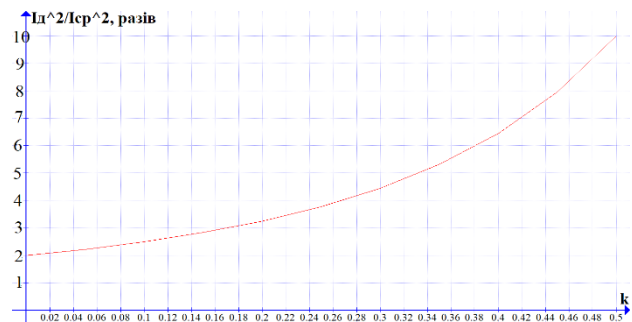


Рис. 7 Оцінка втрат потужності

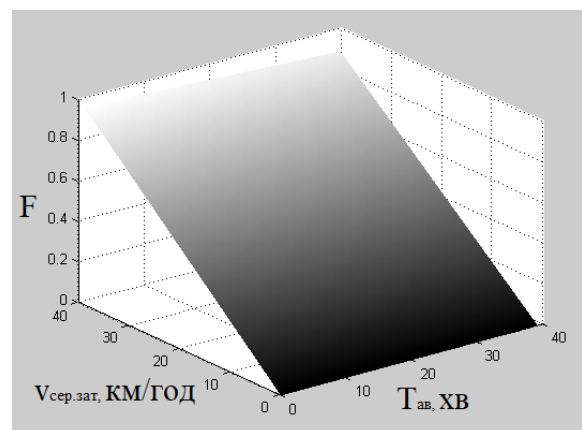


Рис. 8 Вплив заторів та аварій на прибуток маршруту тролейбуса



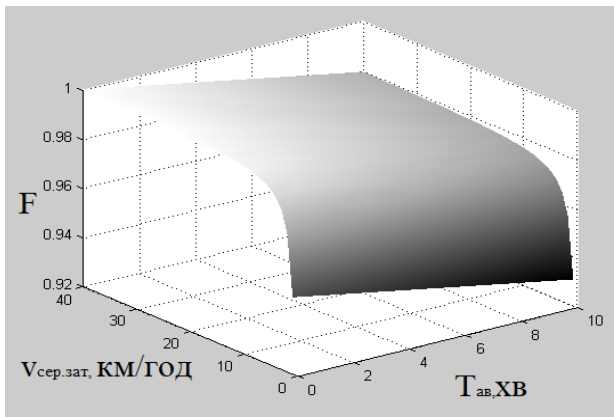


Рис. 9 Вплив заторів та аварій на прибуток працівника, якого перевозить тролейбус

Отже, частка від максимального прибутку працівника:

$$F = \frac{T - T_{зат} - T_{ав}}{T} = \frac{T - \left(\frac{L_{роб}}{v_{сер.зат}} - \frac{L_{роб}}{v_{ном}} \right) - T_{ав}}{T}, \quad (8)$$

де $L_{роб}$ – відстань до роботи працівника.

Використання тролейбуса з високовольтним акумулятором дозволить довести значення $T_{ав}$ до нуля та максимально збільшити середню швидкість просування тролейбуса під час заторів, що в свою чергу дозволить значно збільшити прибуток маршруту тролейбуса.

V. АНАЛІЗ ТРОЛЕЙБУСНИХ І АВТОБУСНИХ МАРШРУТІВ МІСТА КИЄВА

Було зроблено мапу тролейбусних та автобусних маршрутів міста Києва [24].

Для міста Києва було пораховано сумарну довжину автобусних та тролейбусних маршрутів, протяжність спільних ділянок маршрутів, по яких рухаються і тролейбуси, і автобуси, а також довжину ділянок, по яких тролейбуси та автобуси рухаються окремо, тобто ділянок, які не співпадають:

$$L_{сум} = 1442.71 \text{ км}, \quad L_{спільне} = 680.83 \text{ км}, \\ L_{сум.несп} = 761.87 \text{ км}.$$

Таким чином, спільні ділянки тролейбусних та автобусних маршрутів складають 47% від загальної довжини всіх маршрутів, а ділянки, де їх маршрути не співпадають, 53% відповідно.

Також на основі зробленої карти маршрутів було з'ясовано якої протяжності більша частина неспівпадаючих ділянок автобусних та тролейбусних маршрутів та побудовано гістограму, яка це демонструє, рис.10. Дана гістограма схожа на закон розподілу Пуассона. Побудуємо функцію ймовірності цього закону за такою формулою:

$$p(k) = P(Y = k) = \frac{\lambda^k}{k!} e^{-\lambda}, \quad (9)$$

де λ – математичне очікування випадкової величини.

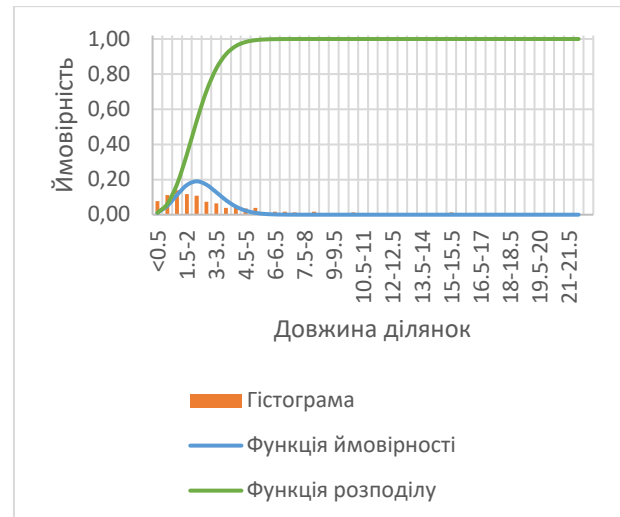


Рис. 10 Гістограма неспівпадаючих ділянок маршрутів та закон розподілу Пуассона

Вираз для функції розподілу закону Пуассона:

$$p(k) = \frac{\Gamma(k+1, \lambda)}{k!}. \quad (10)$$

Функції ймовірності та розподілу закону Пуассона були побудовані при $\lambda = 4.5$.

З рис.10 видно, що високовольтний акумулятор тролейбуса з комбінованою системою електроживлення має бути розрахованим на відстань автономного ходу 4.5 км. У цьому випадку покривається 95% всіх неелектрифікованих маршрутів.

Визначимо ємність акумулятора за такою формулою:

$$C = \frac{L \cdot W}{U} = 71 \text{ А} \cdot \text{год}, \quad (11)$$

де $L = 4.5$ км – відстань, на яку має бути розрахований високовольтний акумулятор; $W = 9.472$ кВт·год – енергія на 1 км шляху з урахуванням розгону і гальмування [22]; $U = 600$ В – напруга високовольтного акумулятора.

Обчислимо потужність високовольтного акумулятора:

$$P = U \cdot C = 600 \cdot 71 = 42.6 \text{ кВт} \cdot \text{год}.$$

Розрахований акумулятор побудований на основі літій-іонної технології.

VI. ЕКОНОМІЧНИЙ ЕФЕКТ ВІД КОМБІНОВАНОЇ СИСТЕМИ ЕЛЕКТРОЖИВЛЕННЯ ТРОЛЕЙБУСА

Розрахуємо ціну високовольтного акумулятора. Ціна 1 кВт енергоємності акумулятора складає 10000 гривень [23]. Отже вартість високовольтного акумулятора становить:

$$M = P \cdot 400 = 42.6 \cdot 10000 = 426000 \text{ грн}.$$

Порівняємо прибуток звичайного тролейбуса та тролейбуса з високовольтним акумулятором в умовах заторів та аварій. Нехай ϵ тролейбусний маршрут з такими даними:

$$T_{роб} = 1080 \text{ хв}; T = 68 \text{ хв}; C_{тр.коло} = 1564 \text{ грн};$$

$$N_{кіл} = \frac{T_{роб}}{T} = \frac{1080}{68} = 16,$$

де $C_{тр.коло}$ – прибуток тролейбуса за одне коло маршруту; $T_{роб}$ – тривалість робочого дня тролейбуса; $N_{кіл}$ – кількість кіл, яку тролейбус здійснить за день.

Скориставшись формулою (6), обчислимо частку прибутку звичайного тролейбуса:

$$F = \frac{T}{T + T_{ав}} \cdot \frac{v_{сер.зат}}{v_{ном}} = \frac{68}{68 + 3.4} \cdot \frac{15}{40} = 35.7\%$$

або 558.34 грн.

Частка прибутку тролейбуса з високовольтним акумулятором:

$$F = \frac{T}{T + T_{ав}} \cdot \frac{v_{сер.зат}}{v_{ном}} = \frac{68}{68 + 3.4} \cdot \frac{20}{40} = 47.6\%$$

або 744.46 грн.

Тобто вигреш в прибутку тролейбуса з високовольтним акумулятором порівняно зі звичайним тролейбусом складає :

$$\Delta F_{тр} = 744.46 - 558.34 = 186.11 \text{ грн.}$$

Але враховуючи те, що за статистикою з 18 робочих годин на день 4 години припадають на затори, то реальний вигреш у прибутку буде в $18/4 = 4.5$ разів меншим, а саме:

$$\Delta F_{тр} = \frac{186.11}{4.5} = 41.36 \text{ грн.}$$

Термін експлуатації акумулятора складає 5 років, отже порахуємо вигреш у прибутку порівняно зі звичайним тролейбусом саме за цей термін.

Кількість кіл маршруту, які пройде тролейбус за 5 років:

$$N_{кіл} = 29200 .$$

Отже $\Delta F_{тр}$ за 5 років:

$$\Delta F_{тр} = 41.36 \cdot 29200 = 1207712 \text{ грн.}$$

Порівняємо вплив звичайного тролейбуса та тролейбуса з високовольтним акумулятором на прибуток працівника, який дістається тролейбусом на роботу.

Середня заробітна плата в місті Києві складає 16249 грн в місяць. Отже плата працівника за 1 хвилину складає:

$$C_{хв} = 1.69 \text{ грн.}$$

Тривалість робочого дня працівника складає $T_{роб} = 480$ хв. Отже прибуток працівника за 1 день при нормальних умовах :

$$C = T_{роб} \cdot C_{хв} = 480 \cdot 1.69 = 811.2 \text{ грн.}$$

Нехай відстань до роботи працівника $L_{роб} = 7.94$ км; час аварій $T_{ав} = 10$ хв.

Отже частка прибутку працівника від звичайного, якби він діставався на роботу звичайним тролейбусом в умовах заторів та аварій за формулою (8):

$$F = \frac{T - T_{зат} - T_{ав}}{T} = 97.8\%,$$

або 793.35 грн.

Частка прибутку працівника від звичайного, якби він діставався на роботу тролейбусом з високовольтним акумулятором в умовах заторів та аварій:

$$F = \frac{T - T_{зат} - T_{ав}}{T} = 99.9\%,$$

або 810.38 грн.

Тобто вигреш в прибутку працівника за день у випадку, якщо він буде діставатися на роботу тролейбусом з високовольтним акумулятором, складе:

$$\Delta F_{пр} = 810.38 - 793.35 = 17.03 \text{ грн.}$$

За 5 років вигреш у прибутку працівника складе:

$$\Delta F_{пр} = 20436 \text{ грн.}$$

Але ці розрахунки проведені для одного працівника, тобто пасажир тролейбуса. Його ж пасажиромісткість складає 100 осіб. Тому обчислимо вигреш у прибутку для всіх пасажирів тролейбуса:

$$\Delta F_{пр} = 20436 \cdot 100 = 2043600 \text{ грн.}$$

Розрахуємо загальний економічний ефект від використання комбінованої системи електроживлення тролейбуса з високовольтним акумулятором за 5 років:

$$\Delta F_{сум} = \Delta F_{тр} + \Delta F_{пр} - M = 2825312 \text{ грн.}$$

ВИСНОВКИ

У статті розроблена комбінована система електроживлення тролейбуса, ключовим елементом якої є високовольтний літій-іонний акумулятор. Тролейбус є значно більш екологічним та дешевим в експлуатації видом транспорту, ніж автобус, і в той же час завдяки наявності в нього високовольтного акумулятора він позбавлений головного недоліку звичайного тролейбуса, який рухається виключно за рахунок напруги контактної мережі – низької мобільності. Комбінована система електроживлення дає змогу збільшити середню швидкість просування тролейбуса на маршруті в умовах заторів та довести час аварій до нуля, що вкрай позитивно впливає на прибуток тролейбуса та пасажирів, яких він перевозить, адже вони матимуть змогу максимально швидко дістатися до своєї роботи. Доказом цього є обчислений економічний ефект від використання комбінованої системи електроживлення тролейбуса з високовольтним акумулятором – 2825312 грн, що у 6.6 разів більше ніж вартість акумулятора. Отже, тролейбус з комбінованою системою електроживлення є вкрай вигідним видом громадського міського транспорту та має дуже великий потенціал.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

- [1]. Morcos, M. M., Dillman, N. G., & Mersman, C. R. (2000). Battery chargers for electric vehicles. *IEEE Power Engineering Review*, 2000 20(11), p. 8–11, 18. DOI: [10.1109/39.883280](https://doi.org/10.1109/39.883280)
- [2]. Schmidt-Rohr, Klaus, «How Batteries Store and Release Energy: Explaining Basic Electrochemistry», *Journal of Chemical Education*. 95 (10): 18011810, 2018. DOI: [10.1021/acs.jchemed.8b00479](https://doi.org/10.1021/acs.jchemed.8b00479).
- [3]. Pistoia, Gianfranco «Batteries for Portable Devices», *World Trolleybus Encyclopaedia*. Yateley, Hampshire, UK, 2005.
- [4]. Murray, Alan. "Farewell to a Rural Trolleybus". *Trolleybus Magazine* No. 94, May-June 1977. p. 65. National Trolleybus Association (UK)
- [5]. Rosenblum, J. L., Allen, D. W., Bennett, T. L., Warade, R. K., & Stoughton, C. M. (2019). "Method for assessing bus delay in mixed traffic to identify transit priority improvement locations in Cambridge, Massachusetts". *Transportation Research Record*, 2019, 2533(1), pp. 60-67. DOI: [10.3141/2533-07](https://doi.org/10.3141/2533-07).
- [6]. «Trolleybus» [Electronic resource], URL: <https://en.wikipedia.org/wiki/%D0%A2%D1%80%D0%BE%D0%BB%D0%B5%D0%B9%D0%B1%D1%83%D1%81>
- [7]. Mary Bellis «History and Timeline of the Battery», 2019, URL: <https://www.thoughtco.com/battery-timeline-1991340>.
- [8]. Borvon, Gerard, «History of Electrical Units», Association S-EAU-S., 2012.
- [9]. I. Galkin, A. Blinov, I. Verbytskyi, D. Zinchenko, «Modular Self-Balancing Battery Charger Concept for Cost-Effective Power-Assist Wheelchairs», *Energies* 2019, 12, 1526. DOI: [10.3390/en12081526](https://doi.org/10.3390/en12081526).
- [10]. A. G. Kyselova; I. V. Verbitskyi; G. D. Kyselov. «Context-aware framework for energy management system», 2nd International Conference on Intelligent Energy and Power Systems (IEPS), Kyiv, 2016, P. 1-4. DOI: [10.1109/IEPS.2016.7521890](https://doi.org/10.1109/IEPS.2016.7521890).
- [11]. I. Verbytskyi, O. Bondarenko, D. Vinnikov, «Multicell-type current regulator based on Cuk converter for resistance welding», 2017 IEEE 58th International Scientific Conference on Power and Electrical Engineering of Riga Technical University (RTUCON), Riga, 2017, Pp. 1 – 6. DOI: [10.1109/RTUCON.2017.8124844](https://doi.org/10.1109/RTUCON.2017.8124844).
- [12]. B. Kang, G. Cedar «Battery materials for ultrafast charging and discharging», *Nature*. 458 (7235): 190193. 2009, DOI: [10.1038/nature07853](https://doi.org/10.1038/nature07853).
- [13]. Filip M. Gieszczykiewicz. «Sci.Electronics», 2010, URL: http://repairfaq.org/REPAIR/F_Repair.html.
- [14]. M. B. Shelest, P. I. Hayda «Bases of structure and operation of rechargeable batteries», Sumy: Sum. state. Univ., 210 p, 2014.
- [15]. Schweber, Bill, «Lithium Batteries: The Pros and Cons», *Global-Spec*. 2015.
- [16]. D. A. Khrustalev «Akumlyatory [Accumulators]», M.: Izumrud , 224 p , 2003.
- [17]. V. Lavrus «Batareyki i akumulyatory [Batteries and accumulators]», Kiev NiT, 1995.
- [18]. Susanne Fowler and Paul Mozur, «Samsung's Recall: The Problem With Lithium-Ion Batteries», *The New York Times*, 2016. URL: <https://www.nytimes.com/2016/09/03/technology/samsungs-recall-the-problem-with-lithium-ion-batteries.html?searchResultPosition=1>
- [19]. Hislop, Martin, «Solid-state EV battery breakthrough from Li-ion battery inventor John Goodenough», *North American Energy News*, 2017. URL: <http://theamericanenergynews.com/markham-on-energy/solid-state-battery-advance-goodenough>
- [20]. T. R. Crompton, «Battery Reference Book», Oxford Newnes, 2000.
- [21]. Ronald Dell, David Anthony, James Rand, «Understanding Batteries», Royal Society of Chemistry, 2001. ISBN: 978-0-85404-605-8. DOI: [10.1039/9781847552228](https://doi.org/10.1039/9781847552228)
- [22]. I. A. Martyukhin, M. V. Bely «Vehicle with a battery with reduced overall dimensions», *ElectronAccountEng*, vol. 2, no. 1, pp. 16-20, 2019. URL: <http://feltran.kpi.ua/article/view/162155>
- [23]. «Tesla Powerwall 2 Datasheet - North America» [electronic resource], URL: https://www.tesla.com/sites/default/files/pdfs/powerwall/Powerwall%2020_AC_Datasheet_en_northamerica.pdf
- [24]. «Map of bus and trolleybus routes», URL: <https://kyivroutes.blogspot.com/2019/11/blog-post.html>

Надійшла до редакції 07 червня 2019 р.

УДК 621.314.1

Комбинированная система электропитания троллейбуса и экономический эффект от ее использования

Губка^f Е. А., ORCID [0000-0001-6247-869X](https://orcid.org/0000-0001-6247-869X)

Вербицкий^s Е. В., к.т.н. доц., ORCID [0000-0001-7275-5152](https://orcid.org/0000-0001-7275-5152)

Национальный технический университет Украины

«Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского» kpi.ua

Киев, Украина

Аннотация—Статья посвящена разработке комбинированной системы электропитания троллейбуса с высоковольтным аккумулятором, которая позволяет данному транспортному средству двигаться в режиме автономного хода. Предложена структура комбинированной системы электропитания, рассчитано емкость аккумулятора и определены его тип. Предложен новый способ отъема энергии с использованием емкостного накопителя. Показано влияние заторов и аварий на прибыль троллейбусного маршрута. Посчитано общий экономический эффект от использования предложенной системы электропитания и указано ее преимущества по сравнению с системой троллейбуса, который движется исключительно за счет напряжения контактной сети.

Ключевые слова — троллейбус с высоковольтным аккумулятором; комбинированная система электропитания.



UDC 621.314.1

Combined Power Supply System Trolley and Economic Benefits From Its Use

Ie. O. Hubka^f, ORCID [0000-0001-6247-869X](https://orcid.org/0000-0001-6247-869X)Ie. V. Verbytskyi^s, PhD Assoc.Prof., ORCID [0000-0001-7275-5152](https://orcid.org/0000-0001-7275-5152)National technical university of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute " kpi.ua
Kyiv, UkraineDOI: [10.20535/2523-4447.2019.24.4.183845](https://doi.org/10.20535/2523-4447.2019.24.4.183845)

Abstract—In this article the main types of public transport were overviewed, including buses and trolleybuses. But there is no optimal kind of transport: buses are mobile, but they generate huge amounts of gas emissions into the environment and run on expensive fuel, and trolleybuses are cheaper to operate due to cheap electricity, but because of their attachment to transmission lines, they have extremely low mobility and in the event of malfunctions on the trolleybuses themselves, accidents with contact lines or congestion, they will not be able to overcome the area where it occurred. A trade-off between using buses and regular trolleybuses operating solely from the mains is to use a high-voltage battery trolley. The article presents the advantages and disadvantages of the above-mentioned types of public transport, shows the structural diagrams of power systems conventional trolleybus and trolley with high-voltage battery, the so-called combined power system. The advantages of the combined power supply system compared to the usual ones are given. The principle of operation of the mechanism of extraction of energy from the network and from one of the key elements of the combined system - the capacitive drive is explained. Power loss estimation using the combined system is performed and afterwards it showed that losses of the ordinary power supply system are twice higher than losses of combined power supply system. The impact of traffic jams and accidents on the profit of the trolleybus route and on the profits of the passengers it transports is shown and it appeared that the more traffic jams and line voltage interruptions are the more economic losses trolleybus route will have and the less salary it's passengers will get. The study of bus and trolleybus routes of the city of Kyiv was conducted and the corresponding map of these routes was made. The total length of the trolleybus and bus routes is estimated and the map shows the length of the common sections of the routes and the non-coincident sections. The capacity of the high-voltage battery required to cover the trolleybus with the autonomous running of part of the routes where the buses run was calculated. In addition, the total battery capacity was calculated. Considering the cost of the specific power consumption of the battery, i.e. the price of 1 kW of its energy, its cost was estimated. At the end of the article, the overall economic effect of using a trolleybus system is calculated. The common economic effect for all trolleybus passengers was calculated.

Keywords — *trolley with high voltage battery; combined power supply system.*

