

СИСТЕМНИЙ АНАЛІЗ КРИТЕРІЇВ ЕФЕКТИВНОСТІ ТРОЛЕЙБУСІВ З ТЕХНОЛОГІЄЮ IN-MOTION CHARGING ДЛЯ ФОРМУВАННЯ СИСТЕМИ ПІДТРИМКИ ПРИЙНЯТТЯ РІШЕНЬ

Вінницький національний технічний університет

Анотація

У роботі запропоновано системний підхід до визначення критеріїв оцінювання енергетичної ефективності процесів руху ІМС-тролейбуса як основи для створення системи підтримки прийняття рішень. Виконано декомпозицію факторів впливу на енергоспоживання, сформувано систему енергетичних, технічних та експлуатаційних критеріїв і запропоновано їх математичну формалізацію у вигляді багатокритеріальної моделі оптимізації.

Ключові слова: системний аналіз, In-Motion Charging, енергоефективність, критерії оптимізації, математична модель, система підтримки прийняття рішень, автономний хід.

Abstract

The paper proposes a system approach to defining criteria for assessing the energy efficiency of IMC trolleybus motion processes as a foundation for the development of a decision support system. A decomposition of factors influencing energy consumption has been performed, a system of energy, technical, and operational criteria has been formulated, and their mathematical formalization in the form of a multicriteria optimization model has been proposed.

Keywords: system analysis, In-Motion Charging, energy efficiency, optimization criteria, mathematical model, decision support system, autonomous operation mode.

Вступ

У сучасних умовах декарбонізації транспортного сектору електрифікація міського громадського транспорту є одним із ключових напрямів розвитку сталих транспортних систем. Традиційні троллейбусні системи мають високу енергетичну ефективність та низький рівень експлуатаційних викидів, однак їх основним обмеженням є залежність від контактної мережі.

Розширення маршрутної мережі шляхом будівництва нової контактної інфраструктури потребує значних капітальних витрат. Альтернативним рішенням є використання технології In-Motion Charging, яка передбачає оснащення троллейбусів акумуляторними накопичувачами та забезпечує заряджання батареї безпосередньо під час руху під контактною мережею [1].

Сучасні дослідження ІМС переважно зосереджені на стратегічних задачах: визначенні оптимальної ємності батареї та необхідної довжини контактної мережі [1,2]. Водночас недостатньо дослідженим залишається питання операційного керування процесом руху з урахуванням поточних умов експлуатації.

Тому актуальною є задача формування системи критеріїв та математичної моделі, які можуть бути використані як основа для майбутньої системи підтримки прийняття рішень [3].

Основна частина

Процес руху ІМС-тролейбуса розглядається як складна динамічна система, у якій відбувається взаємодія декількох елементів:

$$S = \{V, E, I, B, W\}$$

де:

V – транспортний засіб;

E – енергетичні потоки;

I – інфраструктура контактної мережі;

B – акумуляторний накопичувач;

W – зовнішні фактори впливу.

Для формування критеріїв оптимізації проведено декомпозицію факторів впливу на дві групи. До статичних факторів належать: геометрія маршруту, профіль висот, характеристики дорожнього покриття, розташування ділянок контактної мережі. До динамічних факторів: швидкість руху, маса транспортного засобу, пасажиропотік, дорожня ситуація, тривалість зупинок, температура акумулятора [4].

ІМС має два принципово різні режими:

- **Режим 1 — тролейний (під контактною мережею)**

Джерела: контактна мережа, рекуперація.

Енергія йде на: тягу, заряд акумулятора.

Енергетичний баланс:

$$E_{grid} = E_{tr} + E_{ch} - E_{rec}$$

де:

E_{grid} – енергія від мережі;

E_{tr} – енергія на рух;

E_{ch} – енергія заряджання батареї;

E_{rec} – рекуперована енергія.

Енергетичний критерій. Питоме енергоспоживання:

$$K_E^c = \frac{E_{grid}}{L}$$

де:

E_{grid} – сумарна спожита електрична енергія на проходження маршруту;

L – довжина маршруту.

Тобто, скільки енергії береться з мережі на 1 км. Але окремо – ефективність заряджання:

$$\eta_c = \frac{E_{ch}}{E_{grid}}$$

Акумуляторний критерій. Батарея заряджається:

$$SOC(t + 1) = SOC(t) + \frac{\eta_c E_{ch}}{C_b}$$

де: C_b – ємність батареї.

- **Режим 2 — безтролейний (автономний)**

Тут мережі немає: $E_{grid} = 0$

Енергія: тільки акумулятор, частково рекуперація.

Енергетичний баланс:

$$E_b = E_{tr} - E_{rec}$$

Енергетичний критерій. Питоме енергоспоживання:

$$K_E^b = \frac{E_b}{L}$$

де: E_b – енергія, витрачена батареєю.

Акумуляторний критерій. Батарея розряджається:

$$SOC(t + 1) = SOC(t) - \frac{E_b}{C_b}$$

Критерій використання акумулятора. Для оцінювання режиму роботи накопичувача:

$$K_{SOC} = \Delta SOC = SOC_{max} - SOC_{min}$$

що характеризує глибину циклу заряду-розряду.

Зменшення цього показника дозволяє знизити деградацію батареї:

$$D_B = f(\Delta SOC, T, I)$$

де:

T – температура;

I – зарядний струм.

Критерій ефективності рекуперації:

$$K_R = \frac{E_R}{E_B}$$

де:

E_R – використана рекуперована енергія;

E_B – потенційна енергія гальмування.

Критерій транспортної якості або дотримання графіка:

$$K_T = \frac{|t_f - t_p|}{t_p}$$

де:

t_f – фактичний час проходження маршруту;

t_p – плановий час.

Інтегральний критерій оптимізації. Оскільки є різні режими енергопостачання у момент часу t , вводимо змінну режиму:

$M(t) = 1$ – рух під контактною мережею; 0 – автономний рух від акумулятора

окремі критерії можуть мати суперечливий характер, пропонується застосування багатокритеріальної моделі:

$$J(M) = w_1 K_E(M) + w_2 K_{SOC}(M) + w_3 K_R + w_4 K_T$$

де:

w_i – вагові коефіцієнти критеріїв.

Оптимальне рішення визначається:

$$M^* = \operatorname{argmin}(J(M))$$

Оптимальне рішення визначається як вибір послідовності режимів енергопостачання, що забезпечує мінімізацію інтегрального критерію з урахуванням енергоспоживання, стану акумуляторного накопичувача та експлуатаційних обмежень.

Сформована модель може бути основою для майбутньої СППР, яка використовуватиме дані GPS-навігації, цифрових моделей рельєфу та параметрів транспортного засобу для оцінювання найбільш раціонального режиму руху [4].

Висновки

Проведений системний аналіз показав, що ефективність технології In-Motion Charging визначається не лише конструктивними параметрами акумуляторної системи, а комплексною взаємодією транспортного засобу, контактної мережі та умов експлуатації.

Сформовано систему критеріїв оцінювання енергетичної ефективності ІМС-тролейбуса, що включає показники енергоспоживання, використання акумулятора, рекуперації та експлуатаційних обмежень.

Запропонована багатокритеріальна математична модель може бути використана як основа для розроблення системи підтримки прийняття рішень, яка дозволить оптимізувати вибір режимів живлення та знизити сумарні енергетичні витрати транспортної системи.

Це дослідження виконав за сприяння своїх наукових керівників: професорів Б.І. Мокіна та О.Б. Мокіна.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Kendra M., Pribula D., Skrúcaný T., Blažeková O., Stoilova S. Battery-Assisted Trolleybuses: Effect of Battery Energy Utilization Ratio on Overall Traction Energy Consumption. Sustainability. 2024. Vol.16(24). DOI:10.3390/su162411303.
2. Grygar D., Koháni M., Štefún R., Drgoňa P. Analysis of limiting factors of battery assisted trolleybuses. Transportation Research Procedia. 2019. Vol.40. P.229–235.
3. Резнік Р.Ю., Мокін Б.І., Мокін О.Б. «Системний аналіз та операційна оптимізація процесів руху тролейбусів з технологією In-Motion Charging» Матеріали конференції «LV Науково-технічна конференція підрозділів Вінницького національного технічного університету (2026)», Вінниця, 2026. [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://conferences.vntu.edu.ua/index.php/all-fksa/all-fksa-2026/paper/view/27420> Дата звернення: Черв. 2026
4. Мокін Б.І., Мокін О.Б., Горенюк В.В. До питання оптимізації руху електромобіля з асинхронним електроприводом. Вісник ВНТУ. 2019.

Резнік Роман Юрійович – аспірант групи F4-25a, факультету інтелектуальних інформаційні технологій та автоматизації, Вінницький національний технічний університет, м. Вінниця, e-mail: re3nik.roman@gmail.com;

Reznik Roman Y. – Post-Graduate Student, group F4-25a, faculty of intellectual information technologies and automation, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, e-mail: re3nik.roman@gmail.com;