

СИСТЕМНИЙ АНАЛІЗ ТА ОПЕРАЦІЙНА ОПТИМІЗАЦІЯ ПРОЦЕСІВ РУХУ ТРОЛЕЙБУСІВ З ТЕХНОЛОГІЄЮ IN-MOTION CHARGING

Вінницький національний технічний університет

Анотація

Системний аналіз та операційна оптимізація процесів руху троллейбусів з технологією In-Motion Charging – ефективний спосіб декарбонізації міського транспорту без будівництва нової дороговартісної інфраструктури. Запропоновано створення системи підтримки прийняття рішень для водія на основі «швидких» математичних моделей та методів еквівалентування, що дозволяє оптимізувати енергоспоживання в режимі реального часу. Впровадження результатів забезпечить мінімізацію витрат електроенергії та гарантоване дотримання графіків руху на маршрутах в умовах невизначеності.

Ключові слова: системний аналіз, операційна оптимізація, троллейбус, автономний хід, In-Motion Charging (IMC), енергоефективність, система підтримки прийняття рішень (СППР), метод еквівалентування, невизначеність.

Abstract

System analysis and operational optimization of motion processes for trolleybuses with In-Motion Charging technology represent an efficient way to decarbonize urban transport without constructing new expensive infrastructure. The creation of a driver decision support system based on "fast" mathematical models and equivalence methods is proposed, enabling real-time energy consumption optimization. Implementation of the results will ensure the minimization of electricity costs and guaranteed adherence to traffic schedules on routes under conditions of uncertainty.

Keywords: systems analysis, operational optimization, trolleybus, autonomous mode, In-Motion Charging (IMC), energy efficiency, decision support system (DSS), equivalence method, uncertainty.

Вступ

У сучасних умовах глобальної декарбонізації перехід на екологічно чистий громадський транспорт є пріоритетом сталого розвитку. Традиційні троллейбусні системи, хоч і відповідають екологічним вимогам, мають суттєвий недолік — низьку операційну гнучкість через прив'язку до контактної мережі. Будівництво нової інфраструктури потребує значних капіталовкладень, що часто є фінансово недоступним для міст.

Рішенням цієї проблеми є технологія In-Motion Charging (IMC) – використання троллейбусів, оснащених допоміжними акумуляторними батареями. Це дозволяє транспортним засобам долати значні ділянки (15-20+ км) в автономному режимі, заряджаючись безпосередньо під час руху під наявною мережею [1].

Основна частина

Ефективність експлуатації гібридного електричного транспорту безпосередньо залежить від раціонального балансу між використанням енергії мережі та акумулятора, що потребує детального системного аналізу процесу руху як об'єкта керування. У межах дослідження проведено декомпозицію факторів впливу на енергоспоживання, які поділено на статичні та динамічні. До першої групи віднесено параметри інфраструктури: геометрію маршруту (вертикальний та горизонтальний профілі), якість дорожнього покриття та розташування секційних ізоляторів контактної мережі. Друга група включає випадкові величини з високим рівнем невизначеності: поточну масу транспортного засобу

(залежно від пасажиропотоку), інтенсивність дорожнього руху (затори) та тривалість вимушених зупинок, що критично впливає на температурний режим силових акумуляторів та їх деградацію.

Сучасні наукові дослідження переважно зосереджені на стратегічному рівні: виборі оптимальної ємності батарей та розміщенні ділянок мережі для заряджання [1,2]. Проте задачі операційної оптимізації процесу руху в реальному часі залишаються недостатньо вивченими. Водій тролейбуса, діючи в умовах міської мінливості, не має інструментів для прийняття обґрунтованих рішень про моменти перемикання на автономний хід. Це призводить до ситуацій, коли заряд батареї використовується нерационально, що може загрожувати дотриманню графіка руху або спричиняти надмірні пікові навантаження на мережу.

Доцільним є дослідження з підвищення ефективності математичного та кібернетичного інструментарію для системного аналізу цих процесів. Для досягнення мінімізації сумарних витрат електроенергії необхідно розробити математичні моделі оптимального руху, які враховують можливість динамічного перемикання між джерелами живлення. Оскільки повноцінні диференціальні моделі є занадто складними для бортових обчислень, доцільним є застосування методів еквівалентування[3,4]. Це дозволяє отримати спрощені, «швидкі» моделі, здатні функціонувати в межах бортової системи підтримки прийняття рішень (СППР). Така СППР, використовуючи дані GPS-трекінгу та цифрові карти рельєфу, надаватиме водієві рекомендації щодо найбільш раціонального режиму руху та моменту активації автономного ходу, без додаткових витрат на інфраструктуру [5].

Висновки

Підкреслено, що оснащення тролейбусів акумуляторними батареями є вкрай актуальним та економічно доцільним для українських міст, оскільки дозволяє адаптувати транспортну систему до нових потреб без надмірних витрат на інфраструктуру.

Доведено, що для повноцінної реалізації переваг технології In-Motion Charging необхідно зосередитись на розробці математичних моделей операційної оптимізації.

Обґрунтовано, що створення швидких моделей на основі методів еквівалентування та впровадження відповідних СППР дозволить мінімізувати сукупні енерговитрати, забезпечити дотримання графіків руху та підвищити стабільність роботи громадського транспорту в умовах міської невизначеності.

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, iss. 24. Art. no. 11303. DOI: <https://doi.org/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. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2019.07.035>.
3. Мокін Б. І., Мокін О. Б., Горенюк В. В. До питання оптимізації руху електромобіля з асинхронним електроприводом. Вісник Вінницького політехнічного інституту. 2019. № 3. С. 32–38.
4. Мокін Б. І., Горенюк В. В. Система підтримки прийняття рішень для водія електромобіля. Матеріали 52-ї науково-технічної конференції підрозділів ВНТУ (м. Вінниця, 15–17 березня 2022 р.). Вінниця : ВНТУ, 2022.
5. У Львові деякі маршрути можуть подовжити завдяки тролейбусам з автономним ходом. Lviv.media. 04.01.2026. URL: <https://lviv.media/lvivshchyna/96513-u-lvovi-deyaki-marshruti-mozhut-podovzhiti-zavdyaki-trolejbusam-z-avtonomnim-hodom/> (дата звернення: 04.01.2026).

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;

Мокін Борис Іванович — академік НАПН України, доктор технічних наук, професор кафедри системного аналізу та інформаційних технологій, Вінницький національний технічний університет, м. Вінниця, e-mail: borys.mokin@gmail.com;

Мокін Олександр Борисович – доктор технічних наук, професор кафедри системного аналізу та інформаційних технологій, Вінницький національний технічний університет, Вінниця, e-mail: abmokin@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;

Mokin Borys I. — Academician of NAPS of Ukraine, Dr. Sc. (Eng.), Professor of the Department of System Analysis and Information Technologies, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, e-mail: borys.mokin@gmail.com;

Mokin Oleksandr B. — Dr. Sc. (Eng.), Professor of the Department of System Analysis and Information Technologies, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, e-mail: abmokin@gmail.com.