

4. **Chen Y. et al.** A review of lithium-ion battery safety concerns: The issues, strategies, and testing standards. *Journal of Energy Chemistry*. 2021. Vol. 59. P. 83–99. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jechem.2020.10.017>.

5. **Çetin I. et al.** A comprehensive review of battery thermal management systems for electric vehicles. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part E: Journal of Process Mechanical Engineering*. 2022. Vol. 237, no. 3. DOI: <https://doi.org/10.1177/09544089221123975>.

УДК 621.311:624.132

ОПТИМІЗАЦІЯ ГІБРИДНИХ ЕНЕРГЕТИЧНИХ СИСТЕМ БУДІВЕЛЬНОЇ ТЕХНІКИ

Балака Максим Миколайович, канд. техн. наук, доцент каф. будівельних машин, Київський національний університет будівництва і архітектури, e-mail: balaka.mm@knuba.edu.ua, ORCID 0000-0003-4142-9703

Лисак Сергій Іванович, викладач, ВСП Миколаївський будівельний фаховий коледж Київського національного університету будівництва і архітектури, e-mail: rotterdam85as@gmail.com, ORCID 0009-0009-8695-8925

Федишин Богдан Миколайович, доктор філософії, асистент каф. будівельних машин, Київський національний університет будівництва і архітектури, e-mail: fedyshyn_bm@knuba.edu.ua, ORCID 0000-0003-2420-7332

Будівельна техніка є одним з найбільш енергоємних елементів транспортно-технологічних систем, що визначає витрати палива та обсяги викидів шкідливих речовин у будівельному секторі. Домінування дизельних енергетичних установок забезпечує автономність і високу питому потужність машин, однак супроводжується суттєвими викидами CO₂, оксидів азоту та твердих часток. У контексті глобальних кліматичних цілей і трансформації енергетики [1] питання декарбонізації будівельної техніки набуває системного характеру і потребує комплексного інженерного підходу.

Світові тенденції розвитку відновлюваної енергетики і зниження вартості генерації з відновлюваних джерел енергії (ВДЕ) створюють передумови для інтеграції локальних джерел енергії в структуру будівельного майданчика [2]. Дослідження [3–5] доводять доцільність використання альтернативних моторних палив та гібридизації приводів будівельної техніки як інструменту підвищення енергонезалежності. Окремі аспекти накопичення енергії в приводах машин і можливості рекуперації енергії досліджено у роботі [6], тоді як перехід від дизельних до електрифікованих схем приводу розглянуто у [7]. Разом з тим, наявні дослідження переважно зосереджені на окремих технічних або економічних аспектах модернізації машин. Відсутньою залишається інтегрована модель, яка б поєднувала енергетичний баланс робочого циклу машини, потенціал рекуперації, параметри накопичувача та вплив локальних джерел генерації на техніко-економічні показники експлуатації.

Метою роботи є розроблення інтегрованої аналітичної моделі гібридної енергосистеми будівельної техніки і оцінювання її ефективності за критеріями паливної економічності, зниження емісії та інвестиційної доцільності.

Запропонована система передбачає поєднання двигуна внутрішнього згоряння, електричного генератора, тягового електродвигуна, акумуляторного накопичувача та локального джерела генерації з ВДЕ в межах будівельної інфраструктури. Така архітектура забезпечує адаптивний перерозподіл енергетичних потоків залежно від режиму навантаження, стану накопичувача та доступності відновлюваної генерації. У результаті цього формується гнучка енергетична структура, здатна мінімізувати пікові навантаження на двигун, зменшувати витрати палива та забезпечувати поступовий перехід до низьковоглецевої моделі експлуатації будівельної техніки.

Узагальнений енергетичний баланс системи опишемо рівнянням

$$P_{\text{ДВЗ}}(t) + P_{\text{ВДЕ}}(t) + P_{\text{нак}}(t) = P_{\text{нав}}(t) + P_{\text{втр}}(t), \quad (1)$$

де $P_{\text{ДВЗ}}$ – потужність двигуна внутрішнього згоряння; $P_{\text{ВДЕ}}$ – потужність локальної генерації; $P_{\text{нак}}$ – потужність накопичувача; $P_{\text{нав}}$ – потужність навантаження; $P_{\text{втр}}$ – втрати у системі.

Формалізація балансу дозволяє реалізувати задачу оптимізації розподілу потужності між джерелами енергії з урахуванням реального робочого циклу.

Будівельна техніка працює переважно за циклічних режимів з суттєвими коливаннями навантаження. Частина енергії, що витрачається на розгін робочого органу або підйом вантажу, розсіюється під час гальмування. Інтеграція накопичувача забезпечує рекуперацію цієї енергії та зменшення пікових навантажень. Середню енергетичну потребу за цикл визначаємо як

$$E_{\text{ц}}(t) = \int_0^T P_{\text{нав}}(t) dt. \quad (2)$$

Аналіз експлуатаційних режимів навантажувачів і екскаваторів свідчить, що коефіцієнт потенційної рекуперації може досягати близько 15–25 % [6], що створює умови для стабілізації роботи двигуна внутрішнього згоряння у зоні мінімальної питомої витрати палива.

Енергонезалежність будівельного майданчика може бути підвищена шляхом формування локальних джерел енергії, що поєднують мобільні фотоелектричні установки, накопичувачі та резервні генератори [4]. Частку покриття потреби в енергії за рахунок ВДЕ визначаємо зі співвідношення

$$k_{\text{ВДЕ}} = E_{\text{ВДЕ}}/E_{\text{заг}}, \quad (3)$$

де $E_{\text{ВДЕ}}$ – енергія, що вироблена з відновлюваних джерел, $E_{\text{заг}}$ – загальне енергоспоживання.

Моделювання показує, що при $k_{\text{ВДЕ}} \approx 0,3$ можливе зниження сумарних викидів CO_2 до 40 % порівняно з базовою дизельною схемою за умов інтенсивної експлуатації техніки, що узгоджується зі сценаріями декарбонізації [1].

Комплексне оцінювання гібридної енергетичної системи здійснюється за трьома групами критеріїв: паливною економічністю, екологічним ефектом та інвестиційною доцільністю. Встановлено, що впровадження гібридної системи дозволяє зменшити пікову потужність двигуна до 25 %, знизити питомі витрати палива на 20–30 %, скоротити викиди CO₂ на 35–45 % та забезпечити строк окупності інвестицій у межах 3–5 років. Отримані результати узгоджуються з сучасними тенденціями електрифікації важкої техніки [8, 9].

Висновки

Запропонована інтегрована модель гібридної енергосистеми забезпечує кількісне обґрунтування параметрів накопичення та локальної генерації з ВДЕ, з урахуванням реальних робочих циклів будівельної техніки. Поєднання гібридизації приводів з мікромережевою організацією енергопостачання забезпечує зниження пікових навантажень на двигун, скорочення витрат палива і зменшення викидів при збереженні експлуатаційної автономності машин.

Література

1. World Energy Outlook 2025 : [Електронний ресурс] / **International Energy Agency**. Paris, 2025. URL: <https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2025> (дата звернення: 04.03.2026).
2. Renewable Power Generation Costs in 2022 : [Електронний ресурс] / **International Renewable Energy Agency**. Abu Dhabi, 2023. URL: <https://www.irena.org/Publications/2023/Aug/Renewable-Power-Generation-Costs-in-2022> (дата звернення: 04.03.2026).
3. **Слободчиков В. В., Балака М. М.** Моторні палива з альтернативних енергетичних ресурсів. *Сучасні інноваційні технології підготовки інженерних кадрів для гірничої промисловості і транспорту 2015* : матеріали Міжнар. наук.-техн. конф. (Дніпропетровськ, 21–22 трав. 2015 р.). Дніпропетровськ : НГУ, 2015. С. 250–254.
4. **Тетерятник О., Балака М.** Аналіз шляхів забезпечення енергонезалежності будівельної техніки з використанням відновлювальних джерел енергії. *Гірничі, будівельні, дорожні та меліоративні машини*. 2021. Вип. 97. С. 24–35. DOI: <https://doi.org/10.32347/gbdmm2021.97.0301>.
5. **Балака М., Тетерятник О., Санкін І.** Комплексна оцінка застосування моторних палив. *Сучасні енергетичні установки на транспорті, технології та обладнання для їх обслуговування* : матеріали 14-ї Міжнар. наук.-практ. конф. (Херсон, 16–18 берез. 2023 р.). Херсон : ХДМА, 2023. С. 194–196.
6. **Міщук Д. О., Міщук Є. О., Балака М. М.** Оцінка можливостей накопичення енергії приводом автотранспорту. *Вісник ХНАДУ*. 2021. Вип. 95. С. 171–177. DOI: <https://doi.org/10.30977/BUL.2219-5548.2021.95.0.171>.
7. **Федишин Б. М., Балака М. М., Лисак С. І.** Від дизельних до електричних приводів будівельних машин: енергоефективність та екологічність. *Сучасне автомобілебудування, транспорт і дорожня інфраструктура '2025 (MAITRI 2025)*: тези доп. Міжнар. наук.-практ. конф. (Харків, 30–31 жовт. 2025 р.). Харків : ХНАДУ, 2025. С. 250–254.
8. From Diesel to Electric: Transforming Heavy Machinery : [Electronic resource]. URL: <https://turntide.com/community/transforming-heavy-machinery-from-diesel-to-electric-with-turntide-technology/> (accessed: 04.03.2026).
9. Drive systems for hybrid and fully electric construction machinery : [Electronic resource]. URL: <https://www.baumueller.com/us/industries/e-mobility/construction-vehicles> (accessed: 04.03.2026).