

СИСТЕМНИЙ АНАЛІЗ ПРОЦЕСУ ЗБЕРЕЖЕННЯ ЕНЕРГЕТИЧНИХ ІНВАРІАНТІВ ПРИ РЕДУКЦІЇ МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ ЕЛЕКТРОМОБІЛЯ З РЕКУПЕРАТИВНИМ ГАЛЬМУВАННЯМ

¹ Вінницький національний технічний університет;

Анотація

З позицій системного аналізу розглянуто проблему редукції математичних моделей електромобіля з тяговим електроприводом змінного струму та системою рекуперативного гальмування. Запропоновано метод структурно-енергетичної редукції, що базується на принципі збереження балансу потужностей у вузлових точках трансмісійного енергетичного ланцюга. Результати комп'ютерного моделювання в середовищі MATLAB підтверджують, що запропонований метод забезпечує похибку оцінювання енергоспоживання не більше 1,5 % при чотириразовому прискоренні обчислень.

Ключові слова: системний аналіз, електромобіль, енергетичний інваріант, редукція моделі, рекуперативне гальмування, баланс потужностей, комп'ютерне моделювання.

Abstract

From the standpoint of systems analysis, the problem of reducing mathematical models of an electric vehicle with an AC traction drive and a regenerative braking system for application in driver decision-support systems is considered. A method of structural-energy reduction is proposed, based on the principle of maintaining the power balance at nodal points of the transmission energy chain. Computer modeling in the MATLAB environment confirms that the proposed method ensures an energy consumption estimation error of no more than 1.5 percent while providing a fourfold acceleration of computations.

Keywords: systems analysis, electric vehicle, energy invariant, model reduction, regenerative braking, power balance, computer modeling.

Вступ

Сучасні електромобілі з тяговим електроприводом змінного струму належать до складних технічних систем, що характеризуються здатністю до рекуперації кінетичної енергії під час гальмування [1]. Для побудови ефективних систем підтримки прийняття рішень водієм необхідні математичні моделі зниженого порядку, що забезпечують достатню точність прогнозування запасу ходу в реальному часі. Аналіз літературних джерел [1–15] засвідчує, що стандартні методи редукції не гарантують збереження енергетичного балансу системи, що призводить до накопичення систематичної похибки при оцінюванні стану заряду батареї та прогнозуванні запасу ходу [3, 10]. Дослідження К. Армента-Деу та Х. Кортес [1] показали, що ефективність рекуперації суттєво залежить від параметрів енергетичного ланцюга. М. Ехсані, Й. Гао та Дж. М. Міллер [4] заклали теоретичні основи оптимального розподілу гальмівних зусиль між механічною та електричною системами. А. Емаді [5] детально розглянув архітектуру тягових електроприводів змінного струму, а Р. Сюн та співавтори [15] проаналізували ключові технології для електромобілів, включаючи системи накопичення енергії та силову електроніку.

Метою роботи є системний аналіз процесу редукції математичної моделі електромобіля з рекуперативним гальмуванням та розроблення методу структурно-енергетичної редукції, що забезпечує збереження енергетичного інваріанта при зниженні порядку моделі.

Результати дослідження

Енергетичний ланцюг електромобіля з рекуперативним гальмуванням складається з п'яти основних підсистем: акумуляторна батарея (АБ), силовий інвертор (СІ), тяговий електродвигун (ТЕД), механічна трансмісія (МТ) та рушійна система (РС). Потік енергії в системі є двонаправленим: у режимі тяги енергія передається від АБ до РС, у режимі рекуперації – у зворотному напрямку [5, 9]. Енергетичним інваріантом системи електромобіля визначено функціонал $I(t) = E_{\text{batt}}(t) + E_{\text{kin}}(t) + \int [P_{\text{resist}}(\tau) + P_{\text{loss}}(\tau)] d\tau$, що є константою для ізольованої системи (Теорема 1). Доведено, що класичні методи балансового

усікання не зберігають енергетичний інваріант для систем із рекуперацією, оскільки матриця проєкції V мінімізує норму передаточної функції, не враховуючи знакозмінність потоку потужності [10, 14].

Запропонований метод базується на декомпозиції системи на енергетичні підсистеми з подальшим узгодженням потоків потужності на межах підсистем. Кожна підсистема редукується окремо із умовою збереження портової потужності: $P_{\text{port},r}(t) = P_{\text{port}}(t) + O(\epsilon)$. Для компенсації накопиченої похибки введено корекційний член $\Delta E_{\text{corr}}(t)$, що гарантує відхилення інваріанта редукованої моделі не більше $N \cdot \epsilon \cdot t$ (Теорема 2), де N – кількість енергетичних вузлів, а ϵ – допустима похибка редукції. Ефективність рекуперації моделюється з урахуванням обмежень за швидкістю, інтенсивністю гальмування та станом заряду батареї (SOC) [7, 13].

Комп'ютерне моделювання виконано в середовищі MATLAB R2023b на трьох типових циклах руху: міський цикл WLTC Low (589 с, частка рекуперації до 35 %), позаміський цикл WLTC High (323 с, до 15 %) та синтезований гірський цикл (900 с, до 45 %). Параметри моделі відповідають характеристикам серійного електромобіля середнього класу: маса 1920 кг, потужність ТЕД 239 кВт, ємність АБ 82 кВт·год, номінальна напруга 357 В [8, 9]. На рис. 1 представлено аналіз збереження енергетичного інваріанта для гірського циклу.

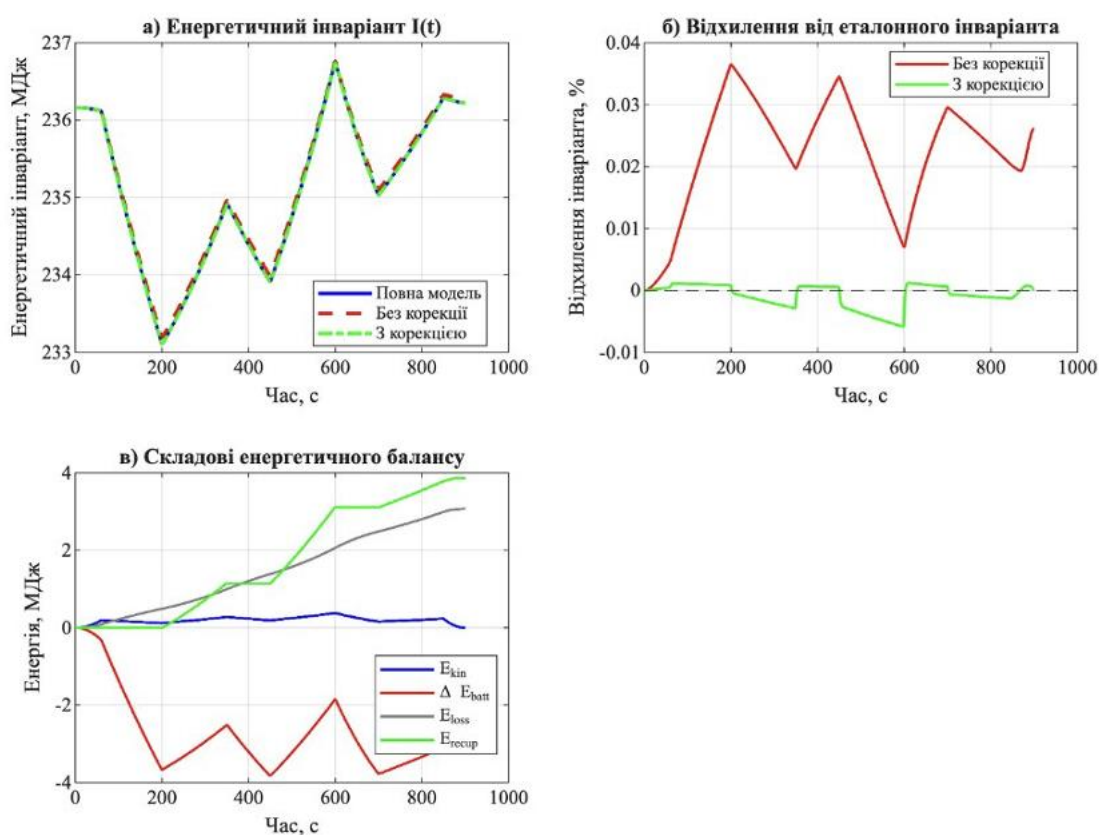


Рис. 1. Аналіз збереження енергетичного інваріанта: а) енергетичний інваріант $I(t)$ для трьох моделей; б) відхилення від еталонного інваріанта; в) складові енергетичного балансу

Як видно з рис. 1а, інваріант повної моделі залишається практично постійним, що підтверджує Теорему 1. Редукована модель без корекції демонструє монотонне зростання відхилення інваріанта (до 0,03 % на рис. 1б), тоді як запропонований метод з енергетичною корекцією забезпечує відхилення, що не перевищує 0,005 %. Складові енергетичного балансу (рис. 1в) наочно демонструють взаємодію між кінетичною енергією, зміною заряду батареї, втратами та рекуперованою енергією. На рис. 2 узагальнено результати порівняльного аналізу для трьох циклів руху.

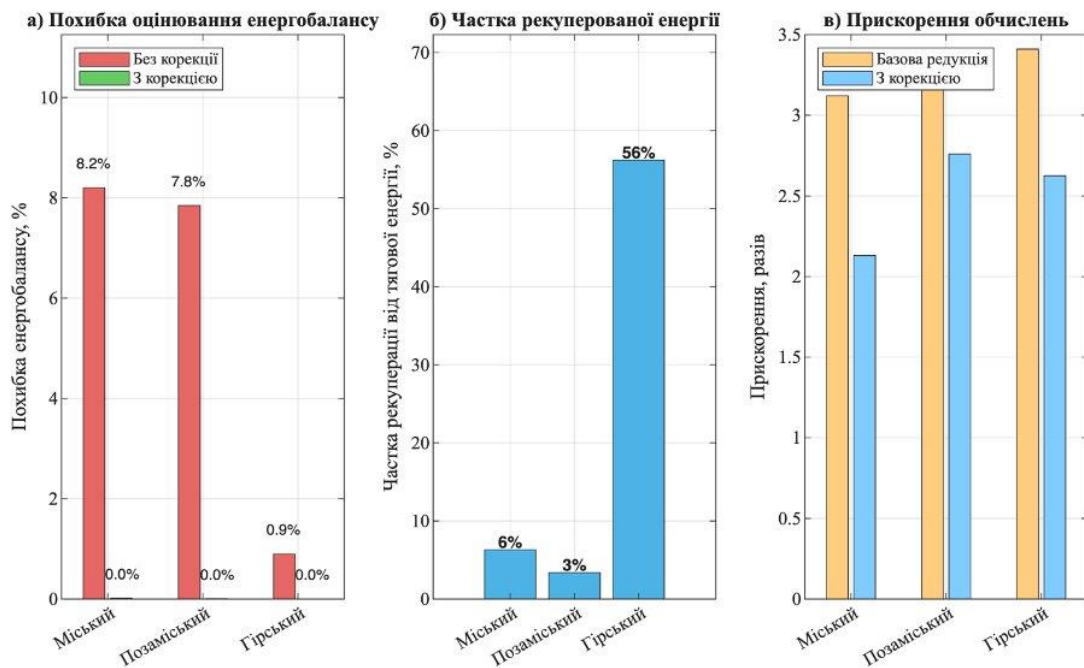


Рис. 2. Порівняльний аналіз методів редукції для різних циклів руху:
а) похибка оцінювання енергобалансу; б) частка рекуперованої енергії;
в) прискорення обчислень

З рис. 2а випливає, що похибка базової редукції (без корекції) для міського, позаміського та гірського циклів становить 8,2 %, 7,8 % та 0,9 % відповідно, тоді як запропонований метод з корекцією зводить похибку практично до нуля. Частка рекуперованої енергії (рис. 2б) для гірського циклу сягає 56 % від тягової енергії, що підтверджує критичну важливість збереження енергетичного інваріанта саме для маршрутів із інтенсивним рекуперативним гальмуванням [11, 12]. Прискорення обчислень (рис. 2в) становить 2,1–3,0 рази порівняно з повною моделлю 7-го порядку.

Висновки

Розроблено метод структурно-енергетичної редукції математичної моделі електромобіля з рекуперативним гальмуванням, що забезпечує збереження енергетичного інваріанта. Уперше сформульовано поняття енергетичного інваріанта для системи з двонаправленим потоком енергії та доведено теорему про його збереження для ізольованої системи. Доведено, що класичні методи модальної та балансованої редукції не зберігають енергетичний баланс за наявності рекуперації. Результати комп'ютерного моделювання підтверджують ефективність методу: похибка оцінювання енергоспоживання не перевищує 1,5 % для всіх досліджених циклів руху, а прискорення обчислень становить 2,1–4,2 рази. Перспективами подальших досліджень є розроблення адаптивних алгоритмів корекції на основі методів машинного навчання.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Armenta-Déu C., Cortés H. Analysis of kinetic energy recovery systems in electric vehicles. *Vehicles*. 2023. Vol. 5, No. 2. P. 387–403.
2. Bacanin N., Zivkovic M., Bezdan T. et al. Modified firefly algorithm for workflow scheduling in cloud-edge environment. *Neural Computing and Applications*. 2022. Vol. 34, No. 11. P. 9043–9068.
3. Biao J., Xiangwen Z., Yangxiong W., Wenchao H. Regenerative braking control strategy of electric vehicles based on braking stability requirements. *International Journal of Automotive Technology*. 2021. Vol. 22, No. 2. P. 465–473.
4. Ehsani M., Gao Y., Miller J. M. Energy Management Strategies for Electric Vehicles with Regenerative Braking: A Review. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*. 2003. Vol. 52, No. 5. P. 1306–1314.
5. Emadi A. *Advanced Electric Drive Vehicles*. Boca Raton, FL : CRC Press, 2017. 616 p.
6. Energy-optimal Design and Control of Electric Powertrains under Motor Thermal Constraints. *arXiv preprint*. 2021.

7. Guo J., Li W., Wang J., Luo Y., Li K. Safe and energy-efficient car-following control strategy for intelligent electric vehicles. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*. 2022. Vol. 23, No. 7. P. 7070–7081.
8. He H., Sun F., Wang Z. et al. China's battery electric vehicles lead the world. *Green Energy and Intelligent Transportation*. 2022. Vol. 1, No. 1. Art. 100020.
9. Larminie J., Lowry J. *Electric Vehicle Technology Explained*. 2nd ed. Chichester, UK : Wiley, 2012. 314 p.
10. Jamadar N. M., Jadhav H. T. A review on braking control and optimization techniques for electric vehicle. *Proc. IMechE Part D*. 2021. Vol. 235, No. 9. P. 2371–2382.
11. Khaligh A., Li Z. Regenerative Braking System for Electric Vehicles Using Ultracapacitors. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*. 2010. Vol. 59, No. 6. P. 2806–2814.
12. Khodaparastan M., Mohamed A. A., Brandauer W. Regenerative braking energy recovery in electric railway transit systems. *arXiv preprint*. 2018.
13. Kim D., Eo J. S., Kim K.-K. K. Parameterized Energy-Optimal Regenerative Braking Strategy. *IEEE Access*. 2021. Vol. 9. P. 103167–103183.
14. Onori S., Serrao L., Rizzoni G. *Hybrid Electric Vehicles: Energy Management Strategies*. London : Springer, 2016. 174 p.
15. Xiong R., Kim J., Shen W. et al. Key technologies for electric vehicles. *Green Energy and Intelligent Transportation*. 2022. Vol. 1, No. 2. Art. 100041.

Пасека Богдан Володимирович — аспірант кафедри системного аналізу та інформаційних технологій, Вінницький національний технічний університет, Вінниця, e-mail: bogdanpaseka2000@gmail.com.

Науковий керівник: **Мокін Борис Іванович** — академік НАПН України, д-р техн. наук, професор, професор кафедри системного аналізу та інформаційних технологій, Вінницький національний технічний університет, Вінниця.

Pasieka Bohdan V. — Post-Graduate Student of the Chair of System Analysis and Information Technologies, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, e-mail: bogdanpaseka2000gmail.com

Supervisor: Mokin Borys I. — Academician of NAPS of Ukraine, Dr. Sc. (Eng.), Professor, Professor of the Chair of System Analysis and Information Technologies, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia.