

Роман Дропа¹, Олексій Чкалов²¹Кафедра систем автоматизованого проектування, Національний університет “Львівська політехніка”, вул. С. Бандери, Львів, Україна, E-mail: roman.i.dropa@lpnu.ua, ORCID 0009-0005-0810-2081²Кафедра систем автоматизованого проектування, Національний університет “Львівська політехніка”, вул. С. Бандери, Львів, Україна, E-mail: oleksii.v.chkalov@lpnu.ua, ORCID 0000-0001-9956-0830

РЕКУПЕРАЦІЯ ЕНЕРГІЇ В ЕЛЕКТРОМОБІЛЯХ: ОПТИМІЗАЦІЯ ПРОЦЕСУ ТА ВПЛИВ НА ПРОБІГ

Отримано: Березень 05, 2025 / Переглянуто: Березень 12, 2025 / Прийнято: Березень 19, 2025

© Дропа Р., Чкалов О., 2025

<https://doi.org/>

Анотація. Рекуперація енергії є ключовим фактором оптимізації ефективності та запасу ходу електромобілів (EVs). У цьому дослідженні моделюється та аналізується процес рекуперації в умовах реального дорожнього руху, з урахуванням таких важливих факторів, як стиль водіння, ухили дороги та дорожні умови. Було проведено порівняльне моделювання за двома підходами: перший враховував стилі водіння та вплив світлофорів, а другий базувався на припущенні рівномірного споживання енергії. Результати показали, що врахування стилю водіння забезпечує точніше прогнозування енергоспоживання, з відхиленнями до 15% залежно від поведінки водія. Агресивний стиль водіння суттєво знижує ефективність рекуперації, тоді як економічне водіння дозволяє максимізувати відновлення енергії. Дослідження підкреслює важливість включення цих реальних факторів у моделі оцінки запасу ходу електромобілів для покращення стратегій управління енергією.

Ключові слова: електромобілі, рекуперація енергії, рекуперативне гальмування, стиль водіння, енергоефективність, оцінка запасу ходу.

Вступ

Одним із важливих принципів технології, яка використовується у сучасних електротранспортних засобах, є рекуперативне гальмування. Воно дозволяє відновлювати частину кінетичної енергії транспортного засобу в період гальмування і конвертувати її в електричну енергію, яка використовується для перезарядки акумулятора. Таким чином, загальний запас ходу транспорту зростає, а енергоефективність автомобіля — підвищується. Принцип роботи системи рекуперативного гальмування полягає в тому, що під час уповільнення електродвигун працює в режимі генератора, перетворюючи кінетичну енергію руху в електричну, яка накопичується в батареї [1].

Ефективність рекуперативного гальмування залежить від цілого ряду факторів: швидкість руху, умови покриття дороги, ключові характеристики стану електротранспортного засобу. Дослідження показують, що в міських умовах, де часті зупинки та прискорення є звичними, система рекуперації може значно підвищити енергоефективність транспортного засобу [2].

Метою цієї статті є аналіз енергоефективності рекуперативного гальмування за різних умов експлуатації електромобіля. Для цього буде змодельовано реалістичний міський маршрут з урахуванням підйомів, спусків, рівнинних ділянок, світлофорів при температурному режимі 0 градусів за Цельсієм. Отримані результати порівнюватимуться з тестовими даними та нормативними показниками, що дозволить оцінити ефективність даної технології та визначити можливі шляхи її оптимізації.

Огляд сучасних джерел інформації за тематикою публікації

Рекуперативне гальмування є ключовою технологією в сучасних електромобілях, що дозволяє відновлювати частину кінетичної енергії під час гальмування та перетворювати її в електричну енергію для зарядки акумулятора. У дослідженні [3] розглядаються переваги та виклики цієї технології, а також її вплив на зарядку електромобілів. Автори зазначають, що ефективність рекуперації залежить від умов водіння, зокрема швидкості та частоти зупинок, і є найбільш ефективною в міських умовах з частими зупинками та прискореннями.

У студентській науковій роботі Харківського національного автомобільно-дорожнього університету [4] представлено математичну модель процесу електродинамічного гальмування автомобіля з електроприводом та системою рекуперації енергії. Автори аналізують роботу, яка здійснюється під час гальмування, та визначають залежності, що описують цей процес. Вони також розглядають вплив різних факторів, таких як сила інерції та сповільнення автомобіля, на ефективність рекуперації.

У статті [5] автори пропонують систему планування швидкості транспортного засобу, яка максимізує відновлення енергії під час рекуперативного гальмування. Використовуючи методи динамічного програмування в реальному часі, вони розробляють оптимальні профілі швидкості для автономних електрифікованих транспортних засобів, враховуючи фізичні обмеження силової установки та умови руху.

Дослідження [6] зосереджується на мінімізації енергоспоживання електроприводу шляхом оптимізації його конструкції та стратегії керування з урахуванням термічних обмежень електродвигуна. Автори розробляють модель, яка враховує теплову динаміку двигуна, та пропонують алгоритм для оптимізації роботи електроприводу, що дозволяє підвищити його ефективність та продовжити термін служби компонентів.

У статті [7] автори аналізують різні методи та технології для відновлення енергії, що генерується під час рекуперативного гальмування в електричних залізничних системах. Вони розглядають оптимізацію розкладу руху поїздів, використання систем зберігання енергії (на борту та на шляху), а також реверсивні підстанції. Хоча дослідження зосереджене на залізничному транспорті, багато висновків можуть бути застосовані до інших видів електротранспорту.

У цій статті [8] автори проводять огляд різних стратегій енергоменеджменту для електромобілів, зосереджуючись на системах рекуперативного гальмування. Вони аналізують методи підвищення ефективності енергозбереження та збільшення пробігу електромобілів за рахунок оптимізації процесу рекуперації. Однак, у статті не розглядаються детально впливи різних дорожніх умов та температурних режимів на ефективність рекуперації, що є важливим для повного розуміння роботи системи в реальних умовах експлуатації.

У статті [9] автори досліджують використання ультраконденсаторів у системах рекуперативного гальмування для підвищення ефективності відновлення енергії в електромобілях. Автори пропонують гібридну систему з використанням акумуляторів та ультраконденсаторів, що дозволяє максимізувати енерговіддачу під час гальмування. Проте, дослідження зосереджене на технічних аспектах системи та не враховує вплив різних режимів руху та умов експлуатації на ефективність рекуперації.

У статті [10] автори аналізують вплив рекуперативного гальмування на енергоспоживання електромобіля в умовах міського руху. Вони досліджують, як різні режими гальмування впливають на загальну ефективність енергоспоживання та пробіг транспортного засобу. Однак, у роботі не розглядаються інші фактори, такі як топографія маршруту або температурні умови, які можуть суттєво впливати на ефективність рекуперації в реальних умовах експлуатації.

Таким чином, хоча ці дослідження роблять значний внесок у розуміння та розвиток систем рекуперативного гальмування в електромобілях, вони не повністю охоплюють вплив різноманітних експлуатаційних умов, таких як дорожні умови, топографія маршруту та температурні режими, на ефективність рекуперації енергії. Додаткові дослідження, що враховують ці фактори, можуть

надати більш повне уявлення про роботу систем рекуперації в реальних умовах та сприяти подальшій оптимізації їхньої ефективності.

Цілі та проблеми дослідження

Більшість існуючих досліджень зосереджуються на загальних аспектах рекуперативного гальмування. Мало уваги приділяється детальному аналізу ефективності рекуперації в умовах міського руху для легкових електромобілів, з урахуванням таких факторів, як різні температурні режими, наявність світлофорів та заторів а також без врахування стилю водіння водія.

Метою цієї статті є аналіз енергоефективності рекуперативного гальмування за різних умов експлуатації електромобіля. Для цього буде змодельовано реалістичний міський маршрут з урахуванням підйомів, спусків, рівнинних ділянок, світлофорів при температурному режимі 0 градусів за Цельсієм. Отримані результати порівнюватимуться з тестовими даними та нормативними показниками, що дозволить оцінити ефективність даної технології та визначити можливі шляхи її оптимізації.

Виклад основного матеріалу

При русі електромобіль накопичує кінетичну енергію E_k , яка може бути частково відновлена під час рекуперативного гальмування:

$$E_k = \frac{1}{2}mv^2, \quad (1)$$

де, m – маса автомобіля (кг), v – швидкість (м/с)

На підйомах і спусках електромобіль витрачає або відновлює потенційну енергію E_p :

$$E_p = m \cdot g \cdot h, \quad (2)$$

де, g – прискорення вільного падіння (9.81 м/с²), h – висота зміни, обчислюється, як $h = L \cdot \sin(\theta)$, L – довжина ділянки (м), θ – кут нахилу (градуси)

Ефективність рекуперативного гальмування залежить від коефіцієнта рекуперації μ :

$$E_r = \mu \cdot (E_k + E_p), \quad (3)$$

де, μ – коефіцієнт рекуперації

На рівних ділянках та підйомах враховується базове енергоспоживання:

$$E_c = C \cdot d, \quad (4)$$

де, C – споживання енергії на км, d – довжина ділянки(км)

Температура впливає на ефективність батареї та рекуперації через коефіцієнт температурного впливу $T_f = 0.9$ при температурі 0 градусів

Враховуючи температуру, коригуються всі енергетичні показники:

$$E_{adjusted} = T_f \cdot E, \quad (5)$$

При зупинці на світлофорі, двигун споживає енергію на холостому ходу:

$$E_{idle} = P_{idle} \cdot t, \quad (6)$$

де, P_{idle} : потужність роботи холостого ходу (300 Вт), t : час очікування (30 секунд)

Для інтеграції стилю водіння в модель енергоспоживання використовується коефіцієнт стилю водіння (k_{style}), який коригує базове енергоспоживання:

$$E_{actual} = E_{base} \cdot k_{style}, \quad (7)$$

де:

$$k_{style} = 1 + \alpha \cdot a_{avg} + \beta \cdot b_{avg} + \gamma \cdot f_{acc/dec} + \delta \cdot \sigma_v^2, \quad (8)$$

де, a_{avg}, b_{avg} – середні прискорення та гальмування, $f_{acc/dec}$ – частота прискорень/гальмувань (циклів/км), σ_v^2 – дисперсія швидкості

Моделювання було виконано за допомогою Python із використанням наступних бібліотек:

- NumPy: для математичних розрахунків.
- Matplotlib: для візуалізації результатів.

- Pandas: для роботи з даними.
- Scipy: для додаткових наукових обчислень.

Процес моделювання базується на аналізі енергоспоживання та рекуперації в реалістичних умовах міського руху. Основні фактори:

- Дорожній профіль: траса довжиною 20 км розділена на 20 сегментів з різними нахилами та стилями водіння.
- Умови руху: а) 10 світлофорів з часом очікування 30 секунд, б) Міський рух із середньою швидкістю 50 км/год.
- Кліматичні умови: температурний режим: 0°C.
- Транспортний засіб: Nissan Leaf (маса 1564 кг, коефіцієнт рекуперації 70%, базове споживання енергії 0,185 кВт·год/км).

На графіку (рис.1.) відображено згенерований маршрут. Синя лінія: показує зміну висоти маршруту (умовна висота на основі нахилу). Червоні вертикальні лінії: позначають позиції світлофорів. Кольорові точки: відображають стиль водіння на кожному сегменті: зелений – економічний стиль, помаранчевий – помірний стиль, червоний – агресивний стиль. Опис сегментів маршруту наведений в таблиці 1: довжина, градус підйому або спуску і стиль водіння.

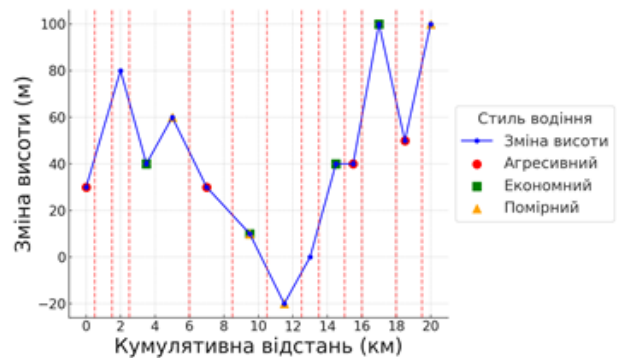


Рис. 1. Дорожній профіль.

Таблиця 1

Опис сегментів маршруту

Сегмент	Довжина (м)	Кут	Стиль водіння
1	1129	3	aggressive
2	806	5	aggressive
3	1237	-5	economical
4	914	3	economical
5	1129	-3	aggressive
6	1452	5	moderate
7	699	3	economical
8	1129	-5	moderate
9	1237	-5	moderate
10	914	0	moderate
11	806	0	economical
12	1237	-3	moderate
13	1237	3	economical
14	699	3	moderate
15	1022	0	aggressive
16	914	3	aggressive
17	591	3	economical
18	1237	-5	aggressive
19	1022	0	aggressive
20	591	5	moderate

Результати та обговорення

У даному дослідженні я розглядав два варіанти: без та із врахування стилю водіння та наявності світлофорів: Результати моделювання з урахуванням стилю водіння та наявності світлофорів наведені у таблиці 2:

Таблиця 2

Результати моделювання з урахуванням стилю водіння та наявності світлофорів

Сегмент	Дистанція (м)	Кут	Стиль водіння	Витрати на сегменті (кВт/год)	Залишкова енергія батареї (кВт/год)
1	1129	3	aggressive	0.497707853	39.50229215
2	1935	5	aggressive	0.487467963	39.01482418
3	3172	-5	economical	-0.086168746	39.10099293
4	4086	3	economical	0.302195512	38.79879742
5	5215	-3	aggressive	0.024716423	38.77408099
6	6667	5	moderate	0.731806743	38.04227425
7	7366	3	economical	0.231110134	37.81116412
8	8495	-5	moderate	-0.087383916	37.89854803
9	9732	-5	moderate	-0.095743051	37.99429108
10	10646	0	moderate	0.148068	37.84622308
11	11452	0	economical	0.1175148	37.72870828
12	12689	-3	moderate	0.022567327	37.70614096
13	13926	3	economical	0.408988893	37.29715206
14	14625	3	moderate	0.256789038	37.04036302
15	15647	0	aggressive	0.1986768	36.84168622
16	16561	3	aggressive	0.402927349	36.43875888
17	17152	3	economical	0.195402131	36.24335674
18	18389	-5	aggressive	-0.114891661	36.3582484
19	19411	0	aggressive	0.1986768	36.1595716
20	20002	5	moderate	0.297863489	35.86170812

Результати моделювання без урахування стилю водіння та наявності світлофорів наведені в таблиці 3:

Таблиця 3

Результати моделювання без урахування стилю водіння та наявності світлофорів

Сегмент	Дистанція (м)	Кут (градуси)	Витрати на сегменті (кВт/год)	Залишкова енергія батареї (кВт/год)
1	1129	3	0.414756544	39.58524346
2	1935	5	0.406223302	39.17902015
3	3172	-5	-0.095743051	39.2747632
4	4086	3	0.335772791	38.93899041
5	5215	-3	0.020597019	38.91839339
6	6667	5	0.731806743	38.18658665

7	7366	3	0.256789038	37.92979761
8	8495	-5	-0.087383916	38.01718153
9	9732	-5	-0.095743051	38.11292458
10	10646	0	0.148068	37.96485658
11	11452	0	0.130572	37.83428458
12	12689	-3	0.022567327	37.81171725
13	13926	3	0.454432104	37.35728515
14	14625	3	0.256789038	37.10049611
15	15647	0	0.165564	36.93493211
16	16561	3	0.335772791	36.59915932
17	17152	3	0.217113479	36.38204584
18	18389	-5	-0.095743051	36.47778889
19	19411	0	0.165564	36.31222489
20	20002	5	0.297863489	36.0143614

Ключові аспекти порівняння

1. Енергоспоживання на сегментах. В першій симуляції середнє енергоспоживання варіювалося залежно від стилю водіння:

- Економічний стиль: 0.216 кВт·год/сегмент.
- Помірний стиль: 0.182 кВт·год/сегмент.
- Агресивний стиль: 0.202 кВт·год/сегмент.

У другій симуляції середнє енергоспоживання було однаковим для всіх сегментів (~0.2 кВт·год/сегмент), що не відповідає реаліям. Отже, можна зробити висновок, що урахування стилю водіння дозволяє коректніше відображати коливання енергоспоживання через поведінку водія.

2. Залишкова енергія батареї. У першій симуляції залишкова енергія батареї наприкінці маршруту складала 35.99 кВт·год. У другій симуляції — 36.01 кВт·год. Звідси випливає, що різниця невелика, але важливо, що у першій симуляції враховано реалістичний розподіл витрат енергії, що точніше прогнозує ситуації з високими витратами (наприклад, агресивне водіння на підйомах).

3. Рекуперація енергії. Перша симуляція показала змінну ефективність рекуперації, залежно від стилю водіння. Наприклад: на агресивному стилі рекуперація становила ~10% нижче через часті гальмування. У другій симуляції рекуперація була однорідною (~0.1 кВт·год/сегмент), що є нереалістичним.

4. Робота на світлофорах. У першій симуляції вплив світлофорів додав 0.03 кВт·год до загальних витрат. У другій симуляції світлофори не враховувалися.

Числові докази переваг першого моделювання.

1. Реалістичне споживання: перший сценарій показав різницю в енергоспоживанні до 0.02–0.03 кВт·год на сегменті залежно від стилю водіння.

2. Точний прогноз пробігу: для середнього маршруту (20 км) це може змінити прогнозований залишковий пробіг на 1–2 км у різних стилях водіння.

Чому варто враховувати стиль водіння.

1. Вплив стилю водіння на споживання енергії. Агресивний стиль значно підвищує енергоспоживання через часті прискорення та гальмування. Економічний стиль, навпаки, дозволяє мінімізувати витрати енергії. Наприклад: У першій симуляції агресивний стиль на підйомі додав ~0.2 кВт·год порівняно з економічним стилем.

2. Точність прогнозів для реальних умов. Відсутність урахування стилю водіння в другій симуляції створює ілюзію однорідного споживання енергії, яке рідко зустрічається на практиці. Це може призводити до помилкових прогнозів запасу ходу, особливо в міських умовах.

3. Вплив на розробку систем прогнозування. Для водіїв важливо знати, як їх поведінка впливає на пробіг. Наприклад, агресивне водіння може зменшити запас ходу на 10-15%.

4. Реалістичний підхід до планування. Моделі, що враховують стиль водіння, дають змогу електромобілю адаптувати рекомендації з урахуванням поведінки водія, наприклад: вибирати оптимальні маршрути, давати поради щодо покращення стилю водіння.

Висновки

Дослідження показало, що врахування стилю водіння та інших реальних умов значно впливає на точність прогнозування енергоспоживання електромобіля. Моделювання, що включає стилі водіння (агресивний, помірний, економічний) та вплив простоїв на світлофорах, дозволяє точніше оцінити залишковий пробіг у міських умовах. У першій симуляції врахування стилю водіння показало різницю у витратах енергії до 15% між різними стилями, що є критично важливим для реалістичних прогнозів. Окрім цього, врахування світлофорів продемонструвало невелике, але вимірюване підвищення енергоспоживання, що підтверджує значущість простоїв у міських маршрутах. Результати моделювання з урахуванням цих факторів вказують на важливість їх включення у програмне забезпечення для планування маршруту електромобілів. Прогноз залишкового пробігу без урахування стилю водіння та світлофорів може бути завищеним, що створює ризики для користувачів. Запропонована модель дозволяє отримати точніші результати, що можуть бути використані для розробки інтелектуальних систем управління енергоспоживанням. Це, у свою чергу, сприяє підвищенню ефективності використання електромобілів у реальних умовах. Майбутні дослідження можуть бути зосереджені на розширенні моделі для врахування додаткових чинників, таких як погодно-кліматичні умови та інтенсивність руху.

Таким чином, розроблений підхід є вагомим внеском у розвиток технологій прогнозування та оптимізації енергоспоживання електротранспорту.

Перелік використаних джерел

- [1] Рекуперативне гальмування в електромобілях: що це, принцип роботи URL: <https://toka.energy/uk/blog/rekuperativne-galnuvannya/>
- [2] Рекуперативне гальмування в електромобілях – простими словами. ECOFACTOR. URL: <https://ecofactortech.com/ua/recuperacia/>
- [3] Дослідження ролі рекуперативного гальмування в зарядці електромобіля | EVCOME. EV Charging Station Manufacturers & Suppliers | EVCOME. URL: <https://www.evcomecharger.com/uk/a-news-exploring-the-role-of-regenerative-braking-in-electric-vehicle-charging>
- [4] ХНАДУ: Харківський національний автомобільно-дорожній університет. URL: https://www.khadi.kharkov.ua/fileadmin/P_vcheniy_secretar/ABTOM_ТРАНСП/Авт_та_тракт_2020/new_r/R_ekyperatsiya.pdf
- [5] Kim D., Eo J. S., Kim K.-K. K. Parameterized Energy-Optimal Regenerative Braking Strategy for Connected and Autonomous Electrified Vehicles: A Real-Time Dynamic Programming Approach. IEEE Access. 2021. Vol. 9. P. 103167–103183. URL: <https://doi.org/10.1109/access.2021.3098807>
- [6] Energy-optimal Design and Control of Electric Powertrains under Motor Thermal Constraints. arXiv.org. URL: <https://doi.org/10.48550/arXiv.2111.07711>
- [7] Khodaparastan, M., Mohamed, A. A., & Brandauer, W. (2018). *Regenerative braking energy recovery in electric railway transit systems: Opportunities and challenges*. arXiv preprint. <https://arxiv.org/abs/1808.05938>
- [8] Ehsani, M., Gao, Y., & Miller, J. M. (2003). *Energy Management Strategies for Electric Vehicles with Regenerative Braking: A Review*. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 52(5), 1306-1314. <https://doi.org/10.1109/TVT.2003.816623>
- [9] Khaligh, A., & Li, Z. (2010). *Regenerative Braking System for Electric Vehicles Using Ultracapacitors to Maximize Energy Recovery*. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 59(6), 2806-2814. <https://doi.org/10.1109/TVT.2010.2049405>

[10] Chan, C. C., & Chau, K. T. (1997). *Impact of Regenerative Braking on Energy Consumption of an Electric Vehicle in Urban Driving*. IEEE Transactions on Energy Conversion, 12(3), 346-353. <https://doi.org/10.1109/60.623968>

Roman Dropa¹, Oleksii Chkalov²

¹ Computer Design Systems Department, Lviv Polytechnic National University, S.Bandery Street 12, Lviv, Ukraine, E-mail: roman.i.dropa@lpnu.ua, ORCID 0009-0005-0810-2081

² Computer Design Systems Department, Lviv Polytechnic National University, S.Bandery Street 12, Lviv, Ukraine, E-mail: oleksii.v.chkalov@lpnu.ua, ORCID 0000-0001-9956-0830

ENERGY RECUPERATION IN ELECTRIC VEHICLES: PROCESS OPTIMIZATION AND IMPACT ON RANGE

Received: March 05, 2025 / Revised: March 12, 2025 / Accepted: March 19, 2025

© Dropa R., Chkalov O., 2025

Abstract. Energy recuperation is crucial to optimizing electric vehicles' efficiency and driving range (EVs). This study models and analyzes the recuperation process under real-world driving conditions, considering key factors such as driving style, road slopes, and traffic conditions. A comparative simulation was conducted using two approaches: one incorporating driving styles and traffic light influences and another assuming uniform energy consumption. The results indicate that accounting for driving styles leads to a more accurate energy consumption prediction, with variations of up to 15% depending on driving behavior. Aggressive driving significantly reduces recuperation efficiency, whereas an economical driving style maximizes energy recovery. The study highlights the importance of including these real-world factors in EV range estimation models to improve energy management strategies.

Keywords: Electric vehicles, energy recuperation, regenerative braking, driving behavior, energy efficiency, range estimation.