

Фізичні основи роботи рекуперативного гальмування: перехід кінетичної енергії в електричну

Вінницький національний технічний університет

Анотація

Рекуперация енергії використовується для оптимізації ефективності та запасу ходу електромобілів. Було проведено порівняльне моделювання за двома підходами: перший враховував стилі водіння та вплив світлофорів, а другий базувався на припущенні рівномірного споживання енергії. Результати показали: агресивний стиль водіння суттєво знижує ефективність рекуперативної енергії, тоді як економічне водіння дозволяє максимізувати відновлення енергії.

Ключові слова: електромобілі, рекуперация, гальмування, стиль водіння, енергоефективність

Abstract

Energy recovery to optimize the efficiency and range of electric vehicles. Comparative modeling was performed using two approaches: the first took into account driving styles and the influence of traffic lights, and the second was based on the assumption of uniform energy consumption. The results showed that aggressive driving significantly reduces the efficiency of recuperation, while economical driving maximizes energy recovery.

Keywords: electric vehicles, recuperation, braking, driving style, energy efficiency

Вступ

Рекуперативне гальмування є важливою технологією, яка використовується у багатьох сучасних електротранспортних засобах. Серед основних переваг такого методу можна зазначити зростання запасу ходу та підвищення енергоефективності електромобіля за рахунок перетворення кінетичної енергії в електричну.

Метою роботи є моделювання та аналіз процесу рекуперативної енергії в умовах реального дорожнього руху, з урахуванням таких важливих факторів, як стиль водіння, ухили дороги та дорожні умови задля поліпшення енергоефективності електромобілів.

Виклад основного матеріалу

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

$$E_k = \frac{1}{2}mv^2$$

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

На підйомах і спусках електромобіль витрачає або відновлює потенційну енергію:

$$E_p = m \cdot g \cdot h$$

де g – прискорення вільного падіння, m – маса автомобіля, а h – висота.

Ефективність рекуперативного гальмування залежить від коефіцієнта рекуперативної енергії μ :

$$E_r = \mu \cdot (E_k + E_p)$$

де μ – коефіцієнт рекуперативної енергії.

На рівних ділянках та підйомах враховується базове енергоспоживання:

$$E_c = C \cdot d$$

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:

При зупинці на світлофорі, $E_{adjusted} = T_f \cdot E$ двигун споживає енергію на холостому ході:

$$E_{idle} = P_{idle} \cdot t$$

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:

$$E_{actual} = E_{base} \cdot k_{style}$$

де:

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

де a_{avg} та 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.

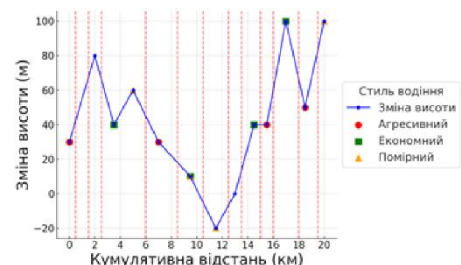


Рис. 1. Дорожній профіль

Таблиця 1

Опис сегментів маршруту

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

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	Агресивний	0.497707853	39.50229215
2	1935	5	Агресивний	0.487467963	39.01482418
3	3172	-5	Економний	-0.086168746	39.10099293
4	4086	3	Економний	0.302195512	38.79879742
5	5215	-3	Агресивний	0.024716423	38.77408099
6	6667	5	Помірний	0.731806743	38.04227425
7	7366	3	Економний	0.231110134	37.81116412
8	8495	-5	Помірний	-0.087383916	37.89854803
9	9732	-5	Помірний	-0.095743051	37.99429108
10	10646	0	Помірний	0.148068	37.84622308
11	11452	0	Економний	0.1175148	37.72870828
12	12689	-3	Помірний	0.022567327	37.70614096
13	13926	3	Економний	0.408988893	37.29715206
14	14625	3	Помірний	0.256789038	37.04036302
15	15647	0	Агресивний	0.1986768	36.84168622
16	16561	3	Агресивний	0.402927349	36.43875888
17	17152	3	Економний	0.195402131	36.24335674
18	18389	-5	Агресивний	-0.114891661	36.3582484
19	19411	0	Агресивний	0.1986768	36.1595716
20	20002	5	Помірний	0.297863489	35.86170812

Таблиця 3

Результати моделювання без урахування стилю водіння та наявності світлофорів

Сегмент	Дистанція(м)	Кут	Стиль водіння	Витрати на сегменті (кВт/год)	Залишкова енергія батареї (кВт/год)
1	1129	3	Агресивний	0.414756544	39.58524346
2	1935	5	Агресивний	0.406223302	39.17902015
3	3172	-5	Економний	-0.095743051	39.2747632
4	4086	3	Економний	0.335772791	38.93899041
5	5215	-3	Агресивний	0.020597019	38.91839339
6	6667	5	Помірний	0.731806743	38.18658665
7	7366	3	Економний	0.256789038	37.92979761
8	8495	-5	Помірний	-0.087383916	38.01718153
9	9732	-5	Помірний	-0.095743051	38.11292458
10	10646	0	Помірний	0.148068	37.96485658
11	11452	0	Економний	0.130572	37.83428458
12	12689	-3	Помірний	0.022567327	37.81171725
13	13926	3	Економний	0.454432104	37.35728515
14	14625	3	Помірний	0.256789038	37.10049611

15	15647	0	Агресивний	0.165564	36.93493211
16	16561	3	Агресивний	0.335772791	36.59915932
17	17152	3	Економний	0.217113479	36.38204584
18	18389	-5	Агресивний	-0.095743051	36.47778889
19	19411	0	Агресивний	0.165564	36.31222489
20	20002	5	Помірний	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. Рекуперація енергії в електромобілях: оптимізація процесу та вплив на пробіг 211
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: вибрати оптимальні маршрути, давати поради щодо покращення стилю водіння.

Висновки

Дослідження показало, що урахування стилю водіння та інших реальних умов значно впливає на точність прогнозування енергоспоживання електромобіля. У першій симуляції урахування стилю

вродіння 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. 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-galmuvannya/>

[2] Рекуперативне гальмування в електромобілях – простими словами. ECOFACTOR. URL:
<https://ecofactortech.com/ua/recuperacia/>

Майданюк Ярослав Олександрович – студент групи 2KN-25б, факультет інтелектуальних інформаційних технологій та автоматизації, Вінницький національний технічний університет, Вінниця, e-mail: maydanuykyaroslav@gmail.com

Науковий керівник: **Мартинюк Володимир Валерійович** – доцент кафедри загальної фізики Вінницького національного технічного університету, Вінниця, e-mail: martynyuk.v.v@vntu.edu.ua

Maydanuyk Yaroslav Oleksandrovich – student of group 2KN-25b, Faculty of Intelligent Information Technologies and Automation, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, e-mail: maydanuykyaroslav@gmail.com

Academic supervisor: **Martyniuk Volodymyr Valeriiovych** — Associate Professor of the Department of General Physics, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, e-mail: martynyuk.v.v@vntu.edu.ua