УДК 629.3:681.5:004.942

В. С. Чорний

УДОСКОНАЛЕННЯ МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ ОПТИМАЛЬНОГО РУХУ ЕЛЕКТРОМОБІЛЯ З УРАХУВАННЯМ МАСИ ВАНТАЖУ, РЕКУПЕРАЦІЇ ЕНЕРГІЇ ТА ТЕПЛОВОГО СТАНУ ЕЛЕКТРОПРИВОДА

Роботу присвячено розробленню удосконаленого математичного опису руху завантаженого електромобіля маршрутом зі змінним нахилом. Досліджується взаємозв'язок між динамікою транспортного засобу, витрачанням і поверненням електричної енергії, нагріванням тягового двигуна та технічними межами, яких необхідно дотримуватися під час формування закону керування. Збільшення корисного навантаження й подолання підйому потребують вищої тягової потужності, тоді як зменшення заряду акумулятора або наближення температури двигуна до граничного значення обмежують доступні режими. Під час руху на спуску частина енергії може бути повернена до батареї, однак інтенсивність цього процесу залежить від швидкості, резерву її ємності та теплового стану електропривода. Тому завданням роботи стало створення фізично обґрунтованої моделі помірної деталізації, придатної для оптимізаційних розрахунків без надмірного ускладнення обчислень. Методологічною основою є положення теорії оптимального керування транспортними електромеханічними системами, адаптовані до автономного джерела живлення та змінної маси. Стан електромобіля задається положенням на маршруті, швидкістю, рівнем заряду акумуляторної батареї та температурою електродвигуна. Керуючою змінною прийнято знакозмінне зусилля на ведучих колесах: додатне значення відповідає тяговому режиму, а від'ємне – електричному або комбінованому гальмуванню. Маса корисного вантажу введена як безперервний параметр повної маси, завдяки чому різні ступені завантаження досліджуються в межах незмінної структури рівнянь. Дорожній профіль задається залежністю кута нахилу від пройденого шляху, що забезпечує відтворення чергування підйомів, спусків і рівних відрізків. Для комплексного оцінювання поточних умов запропоновано узагальнений нечіткий коефіцієнт режимної складності $K_{\Sigma}(t)$. Його формують нормовані показники відносного завантаження, нахилу дороги, заряду батареї, температури двигуна та потенціалу рекуперації. Розрахунок передбачає фазифікацію вхідних даних, застосування бази правил, агрегування результатів і дефазифікацію. Вихідна оцінка дає змогу віднести режим до сприятливої, номінальної, ускладненої або критичної області. При цьому маса та нахил безпосередньо входять до рівняння руху, а нечіткий коефіцієнт коригує узагальнений опір відповідно до поєднання енергетичних і теплових умов. Така побудова не дублює дію фізичних сил та дає змогу врахувати нелінійний взаємовплив чинників без створення окремої громіздкої залежності для кожного з них. Удосконалена модель об'єднує механічну, енергетичну й теплову складові. Перша описує зміну швидкості під дією тягово-гальмівного зусилля, сили тяжіння та опору руху. Друга визначає баланс потужності батареї з урахуванням витрат на тягу, допоміжного навантаження і надходження енергії в рекуперативному режимі. Третя відтворює накопичення тепла від втрат під час роботи двигуна як у моторному, так і в генераторному режимі, а також тепловіддачу до навколишнього середовища. За наближення температури до допустимої межі передбачається обмеження тягової та рекуперативної потужності. Критерій оптимізації поєднує енергетичні витрати, теплове навантаження, інтенсивність керування та плавність його зміни. Розв'язок шукається з дотриманням обмежень на швидкість, стан заряду, температуру, допустимі зусилля й умови проходження заданої ділянки. Науковий результат полягає у створенні цілісного опису автономного електромобіля, в якому змінне завантаження, дорожній рельєф, рекуперативний обмін, стан батареї та нагрівання електропривода узгоджено в одній задачі оптимального керування. Використання $K_{\Sigma}(t)$ забезпечує компактне подання режимної складності зі збереженням фізичного змісту основних балансів. Практична цінність моделі визначається можливістю порівнювати маршрути, маси вантажу, налаштування рекуперації та температурні обмеження, а

надалі використовувати результати для синтезу енергоощадного алгоритму керування в реальному часі.

Ключові слова:*електромобіль, оптимальне керування, математична модель, нечітка логіка, рекуперація енергії, маса вантажу, стан заряду, тепловий стан електропривода.*

Постановка проблеми

Ефективність руху завантаженого електромобіля визначається одночасним впливом маси вантажу, профілю дороги, стану заряду батареї, можливості рекуперації та температури електропривода. Наявні моделі переважно враховують ці фактори окремо, що або ускладнює їх практичне застосування, або знижує точність опису реальних режимів. Тому актуальним науковим і практичним завданням є побудова компактної моделі оптимального керування, яка забезпечує мінімізацію енергоспоживання, ефективне використання рекуперації та дотримання теплових і технічних обмежень електропривода.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Методологічну основу оптимізації руху транспортних електромеханічних систем сформували Мокін Б. І. та Мокін О. Б., розглянувши моделювання динамічних об’єктів, критерії оптимальності, обмеження і методи Лагранжа, Понтрягіна, Беллмана та Рітца. Для електротранспорту запропоновано мінімізувати енерговитрати й декомпозувати маршрут за змінами рельєфу. Водночас моделі орієнтовані на колійний транспорт із контактним живленням, складні для точного відтворення профілю дороги та не враховують SoC, рекуперацію і тепловий стан двигуна [1].

Мокін Б. І. та Мокін О. Б. дослідили мінімізацію втрат трамвайного електропривода за сталого недовантаження і перевантаження методом варіаційної оптимізації інтеграла квадрата струму. Отримано параметричні закони струму та кутової швидкості, достовірність яких оцінюється критеріальними тотожностями. Проте кількісний ефект не наведено, а модель залежить від заданої характеристики намагнічування та не охоплює змінну масу, нахил, рекуперацію, батарею і нагрівання [2].

Konda та колеги поєднали опуклі моделі батареї, двигуна і трансмісії з тепловою мережею та нелінійним програмуванням. Оптимізація передатного числа, рекуперації й охолодження зменшила потрібну максимальну потужність двигуна на 16 %, а постійні магніти виявилися термічно лімітуючими. Однак розглянуто заданий цикл і сталу масу без теплових процесів батареї, інвертора та трансмісії [3].

Hamednia зі співавторами сформували гібридну модель еко-керування, заряджання і теплового регулювання батареї для горбистого маршруту 440 км. Попереднє підігрівання скоротило час заряджання на 44 % за зміни вартості близько 2 %. Водночас не моделювалися температура тягового двигуна, змінне навантаження і теплова дія рекуперації, оскільки дослідження зосереджене на тривалих поїздках із заряджанням [4].

Van den Hurk і Salazar застосували опуклу модель втрат, аналітичний вибір передатних чисел, динамічне програмування та ітераційний алгоритм. Двоступенева трансмісія знизила енергоспоживання на 3 % відносно одноступеневої та на 2,5 % відносно варіатора; похибка від глобального розв’язку не перевищила 0,03 %. Проте вантаж, повна батарейна і теплова динаміка не враховані для збереження опуклості й швидкодії [5].

Borsboom зі співавторами аналітично змоделювали елементи трансмісії та оптимізували її конструкцію і керування. Двоступенева схема зменшила енерговитрати на 0,8 %, а похибка моделі Nissan Leaf становила 0,2 %. Підхід підтвердив доцільність моделей середньої деталізації, проте був обмежений трансмісією без спільного врахування вантажу, рекуперації, SoC і температури [6].

Yu та колеги розробили робастний модельно-прогнозний круїз-контроль у просторовій області. На лондонському циклі отримано 11,53 % економії енергії, зниження втрат рекуперації на 40,1 %, тяги на 18,6 % і сумарних втрат привода на 23,43 %; ітерація тривала 0,141 с. Проте маса залишалась сталою, а теплові ефекти не враховувалися через пріоритет реального часу [7].

Van Kampen та команда створили дворівневу опуклу модель гоночного електромобіля з

температурою двигуна і батареї. Оптимізація заїздів і заряджання дала близько 170 кіл проти 132, тобто приріст 29 %, за похибки 1,78 %. Встановлено, що температурна межа знижує швидкість і рекуперативну потужність, однак модель стосується незавантаженого автомобіля на плоскій трасі [8].

Borsboom та колеги запропонували опуклу сурогатну модель втрат електродвигуна. Для автомобіля масою 1850 кг визначено потужність 145 кВт і передатне число 5,7; похибка енергії становила
0,12–0,21 %. Водночас знехтувано масою двигуна, прийнято сталий ККД трансмісії та необмежену ефективність охолодження, тому тепловий стан не включено до керування [9].

Korzilius зі співавторами оптимізували мікромобільні електротранспортні засоби для рівнинних і горбистих маршрутів частково опуклим програмуванням із перерахунком маси. Для електросамоката пагорби підвищили вартість на 7,4 %, ємність батареї з 435 до 491 Вт·год, потужність із 590 до 640 Вт; похибка становила 0,42–1,00 %. Проте масу вантажу системно не досліджено, теплові обмеження відсутні [10].

Huang та дослідники поєднали фізичну модель із адитивними моделями, випадковим лісом і бустингом. Середня похибка знизилася з 37,9 % до 10,3–11,5 %, що підтвердило ефективність агрегування неврахованих факторів. Проте модель призначена для прогнозування на обмеженій вибірці та не визначає вплив агрегованого показника на тягу, рекуперацію і температуру [11].

Issa зі співавторами створили нечіткий регулятор за SoC і потужністю батареї, перевірений у MATLAB/Simulink та експериментально. Він утримував SoC у межах 40–95 %, а потужність – до 1000 Вт, перевершивши пропорційне керування. Однак досліджено стаціонарну наномережу, а не рух; не враховано масу, нахил, рекуперацію і температуру двигуна [12].

Проведений авторський аналіз показує, що розглянуті підходи можна умовно поділити на три групи: оптимізація електропривода і трансмісії [1–3, 5, 6, 9, 10], еко-керування з урахуванням рекуперації та теплових обмежень [4, 7, 8], а також застосування агрегованих і нечітких моделей [11, 12]. Підходи першої та другої груп забезпечують достатню фізичну обґрунтованість, але переважно орієнтовані на сталу масу або окремі підсистеми електромобіля. Третя група спрощує багатофакторний опис, проте не встановлює безпосереднього зв’язку агрегованого показника з динамікою завантаженого електромобіля. Це обґрунтовує доцільність поєднання фізичної моделі руху з узагальненим нечітким коефіцієнтом, який комплексно враховує режимні, енергетичні й теплові чинники.

Відсутня компактна модель, що одночасно пов’язує змінну масу вантажу, профіль дороги, заряд батареї, рекуперацію і тепловий стан із тяговим або гальмівним зусиллям. Причинами є нелінійність зв’язків, різні часові масштаби, дефіцит даних і суперечність між точністю та обчислювальною придатністю. Тому невирішеною залишається побудова фізично змістовної, але компактної моделі оптимального руху завантаженого електромобіля з узагальненням основних факторів засобами нечіткої логіки.

Метою дослідження є удосконалення математичної моделі оптимального руху електромобіля шляхом введення узагальненого нечіткого коефіцієнта режимної складності, що враховує масу вантажу, дорожній профіль, SoC, рекуперацію енергії та температуру електропривода. Для досягнення поставленої мети необхідно удосконалити базову модель динаміки електромобіля; врахувати вплив маси вантажу, профілю дороги, стану заряду батареї, рекуперації та температури електропривода; сформувати узагальнений нечіткий коефіцієнт режимної складності; визначити критерій оптимальності й систему обмежень.

Виклад основного матеріалу дослідження

За основу дослідження прийнято підхід Б. І. Мокіна та О. Б. Мокіна до оптимізації руху транспортних засобів з електричною тягою, відповідно до якого електричний транспортний засіб розглядається як керований динамічний об’єкт, а оптимальний режим визначається шляхом мінімізації заданого критеріального функціонала за наявності рівнянь руху, граничних умов і технічних обмежень [1]. У базовій моделі рух описується співвідношенням між загальною масою транспортного засобу, тяговою силою, швидкістю та силами опору. У роботі [2] цей підхід розвинено

для режимів сталого недовантаження і перевантаження трамвайного електропривода шляхом визначення оптимальних законів зміни струму тягових двигунів і кутової швидкості їх роторів за критерієм мінімуму електричних втрат.

Обмеженням моделей [1], [2] є орієнтація на колійний електричний транспорт із відносно наперед визначеним режимом навантаження. У них не розглядається автономне живлення від акумуляторної батареї, не моделюється повернення енергії під час гальмування та не вводиться температура тягового електродвигуна як окрема змінна стану. Крім того, режими недовантаження і перевантаження задаються як окремі випадки, тоді як для електромобіля маса вантажу може змінюватися в широкому діапазоні та одночасно взаємодіяти з дорожнім нахилом, станом заряду батареї й тепловим станом привода. Тому удосконалення базової моделі полягає у переході від окремих сталих режимів навантаження до єдиної моделі, придатної для опису руху електромобіля зі змінною масою вантажу на дорозі зі спусками та підйомами.

Електромобіль подається як система з вектором стану

$$x(t) = [s(t) \quad v(t) \quad SoC(t) \quad T_m(t)]^T, \tag{1}$$

де $s(t)$ – пройдений шлях; $v(t)$ – швидкість; $SoC(t)$ – стан заряду акумуляторної батареї; $T_m(t)$ – температура електродвигуна. Керуючою дією є зусилля $F_u(t)$ на ведучих колесах. За $F_u(t) > 0$ електропривод працює у тяговому режимі, а за $F_u(t) < 0$ – у режимі електричного або комбінованого гальмування.

Загальна маса електромобіля визначається як

$$m = m_0 + m_l, \tag{2}$$

де m_0 – маса електромобіля без корисного вантажу; m_l – маса вантажу. На відміну від поділу на окремі режими недовантаження та перевантаження, використаного в [2], величина m_lвводиться як безперервний параметр. Це дає змогу досліджувати довільний рівень завантаження без перебудови структури моделі.

Удосконалена механічна модель руху має вигляд

$$\frac{ds(t)}{dt} = v(t), \tag{3}$$

$$m\frac{dv(t)}{dt} = F_u(t) - mg\sin\alpha(s) - F_0K_\Sigma(t), \tag{4}$$

де g – прискорення вільного падіння; $\alpha(s)$ – кут нахилу дороги, причому $\alpha(s) > 0$відповідає підйому, а $\alpha(s) < 0$ – спуску; F_0 – номінальна сила опору руху; $K_\Sigma(t)$ – узагальнений коефіцієнт режимної складності.

У рівнянні (4) основний вплив маси та дорожнього нахилу враховується безпосередньо через величини mi $mg\sin\alpha(s)$. Коефіцієнт $K_\Sigma(t)$ не дублює ці сили, а коригує номінальну силу опору з урахуванням взаємодії навантаження, профілю дороги, стану батареї, температури двигуна та доступності рекуперації. За номінальних умов його значення наближається до одиниці, у сприятливому режимі зменшується, а в ускладненому або критичному режимі збільшується.

Загальну структуру удосконаленої моделі наведено на рис. 1.

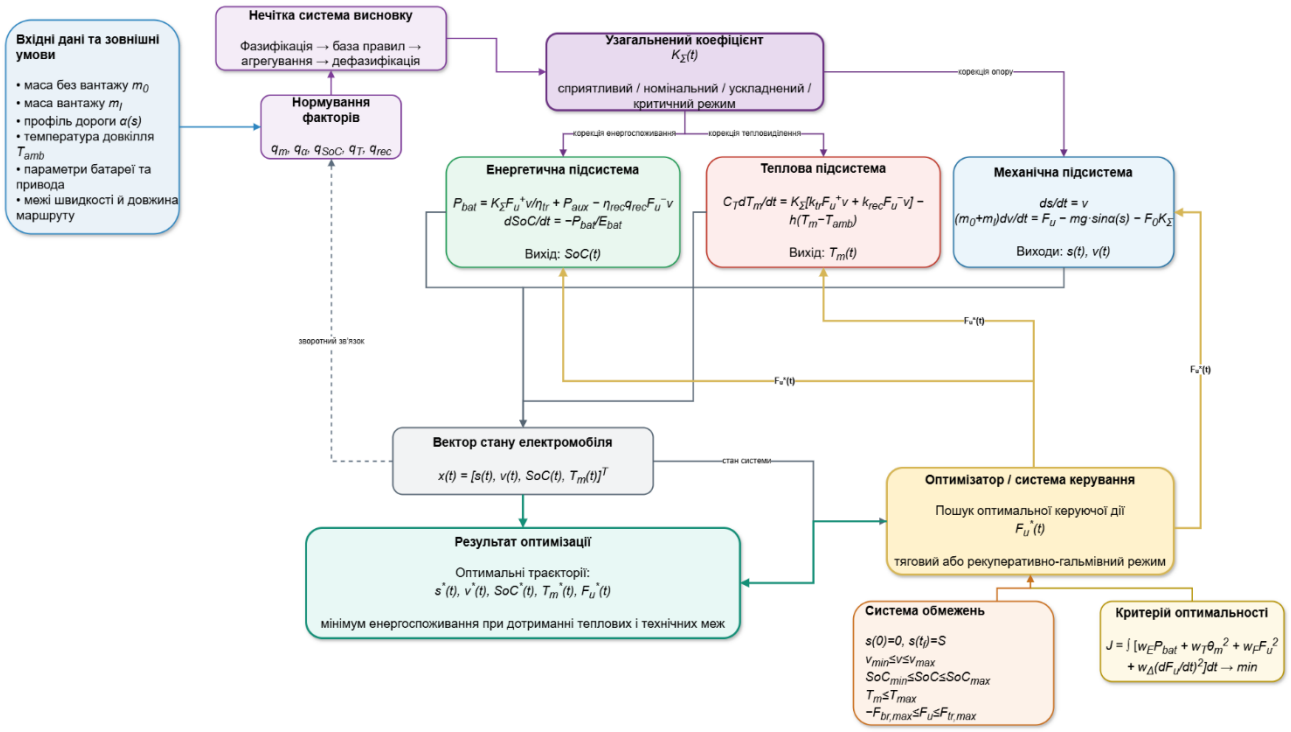


Рис. 1. Структурна схема удосконаленої математичної моделі оптимального руху завантаженого електромобіля

Для формування коефіцієнта $K_\Sigma(t)$ використовуються нормовані показники поточного режиму. Відносне завантаження задається як:

$$q_m = \frac{m_l}{m_{l,max}}, \tag{5}$$

де $m_{l,max}$ – максимально допустима маса вантажу. Показник дорожнього нахилу визначається у вигляді нормованої величини

$$q_\alpha = \frac{\sin\alpha(s)}{\sin\alpha_{max}}, \tag{6}$$

а енергетичний стан батареї – як

$$q_{SoC} = \frac{SoC(t) - SoC_{min}}{SoC_{max} - SoC_{min}}. \tag{7}$$

Нормований тепловий стан електродвигуна задається співвідношенням:

$$q_T = \frac{T_m(t) - T_{amb}}{T_{max} - T_{amb}}, \tag{8}$$

де T_{amb} – температура навколишнього середовища; T_{max} – максимально допустима температура електродвигуна.

Потенціал рекуперації доцільно визначити як:

$$q_{rec}(t) = \eta_{rec}\,\mu_\downarrow(\alpha(s))\mu_v(v(t))\mu_{SoC}(SoC(t))\mu_T(T_m(t)), \tag{9}$$

де η_{rec} – номінальний коефіцієнт рекуперації; $\mu_\downarrow$ характеризує належність поточного нахилу до спуску; μ_v враховує придатність швидкості до рекуперативного гальмування; μ_{SoC} зменшує можливість рекуперації за наближення заряду батареї до верхньої межі; μ_T обмежує рекуперативну потужність у разі перегрівання електродвигуна. Таким чином, повернення енергії визначається не лише наявністю спуску, а й технічною можливістю батареї та привода прийняти цю енергію. Такий підхід узгоджується з результатами [3], де показано, що збільшення рекуперативної потужності супроводжується додатковими втратами та нагріванням електродвигуна.

Узагальнений коефіцієнт формується за допомогою нечіткої системи висновку:

$$K_\Sigma(t) = Fuzzy\{q_m, q_\alpha, q_{SoC}, q_T, q_{rec}\}. \tag{10}$$

Для змінної q_mвикористовуються терми «мале», «середнє» та «велике завантаження»; для q_α – «спуск», «рівна ділянка» та «підйом»; для q_{SoC} – «низький», «допустимий» і «високий заряд»; для q_T – «нормальна», «підвищена» та «критична температура»; для q_{rec} – «низький», «середній» і «високий потенціал рекуперації». Вихідна змінна має терми «сприятливий», «номінальний», «ускладнений» і «критичний режим».

База правил формується відповідно до фізичної логіки роботи електропривода. Велика маса вантажу в поєднанні з підйомом збільшує $K_\Sigma(t)$, оскільки потребує більшої тягової потужності. Якщо цьому режиму відповідає підвищена температура двигуна або низький стан заряду, коефіцієнт переходить до критичної області. Під час руху на спуску за нормальної температури, достатнього резерву ємності батареї та високого потенціалу рекуперації значення $K_\Sigma(t)$ зменшується. За малої маси вантажу, рівної дороги, нормальної температури та допустимого заряду коефіцієнт наближається до одиниці. Використання нечіткої логіки дає змогу врахувати нелінійну взаємодію параметрів без введення окремого складного диференціального рівняння для кожного фактора. Доцільність такого підходу підтверджується можливістю нечітких систем утримувати енергетичні змінні в заданих межах за різних режимів навантаження [12].

Послідовність формування коефіцієнта показано на рис. 2: нормування вхідних параметрів, фазифікацію, застосування бази правил, агрегування результатів і дефазифікацію.

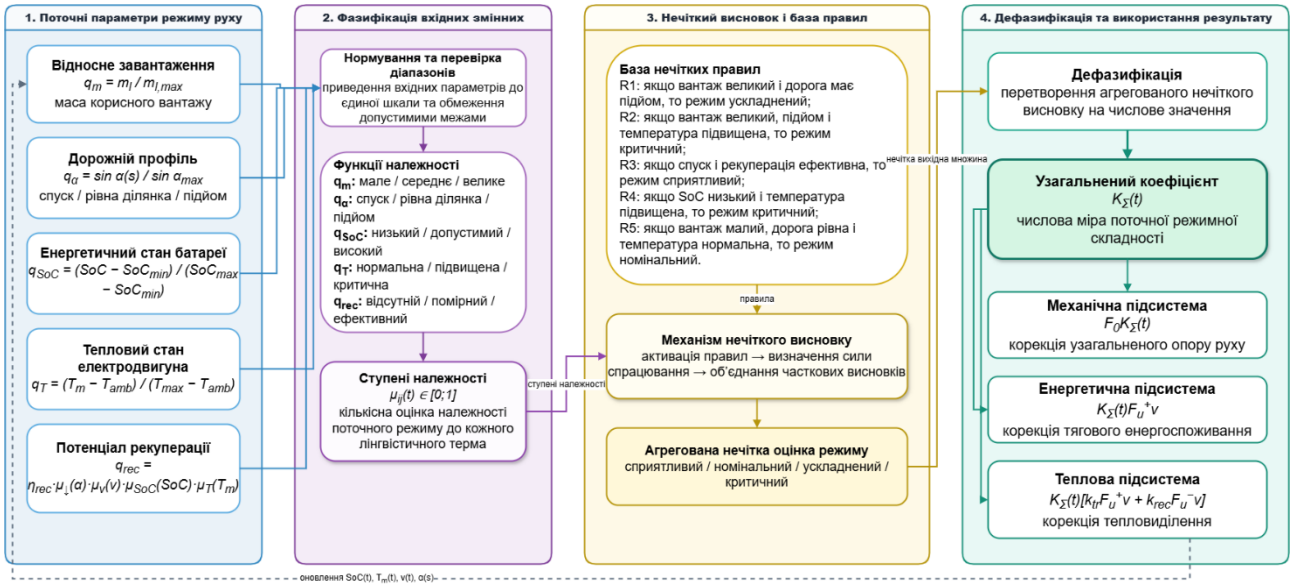


Рис. 2. Схема формування узагальненого нечіткого коефіцієнта режимної складності $K_\Sigma(t)$

Енергетична складова моделі формується з урахуванням розділення керуючого зусилля на тягову та гальмівну частини:

$$F_u^+(t) = \max(F_u(t), 0), F_u^-(t) = \max(-F_u(t), 0). \quad (11)$$

Потужність акумуляторної батареї визначається як:

$$P_{bat}(t) = \frac{K_\Sigma(t) F_u^+(t) v(t)}{\eta_{tr}} + P_{aux} - \eta_{rec} q_{rec}(t) F_u^-(t) v(t), \quad (12)$$

де η_{tr} – ККД електропривода в тяговому режимі; P_{aux} – потужність допоміжних споживачів. Перша складова рівняння (12) описує витрати енергії на створення тягового зусилля. Друга враховує допоміжне навантаження, а третя – потужність, що повертається до батареї під час рекуперації.

Зміна стану заряду батареї задається рівнянням

$$\frac{dSoC(t)}{dt} = -\frac{P_{bat}(t)}{E_{bat}}, \quad (13)$$

де E_{bat} – корисна енергетична ємність акумулятора. На відміну від моделей [1], [2], де електроенергія надходить до електропривода від зовнішньої мережі, рівняння (13) дає змогу

безперервно контролювати енергетичний стан автономного джерела живлення. Врахування залежності допустимої потужності від SoC і температури є важливим для забезпечення реалістичності оптимальної траєкторії [4].

Теплова модель електродвигуна записується у вигляді

$$C_T \frac{dT_m(t)}{dt} = K_\Sigma(t)[k_{tr}F_u^+(t)v(t) + k_{rec}F_u^-(t)v(t)] - h(T_m(t) - T_{amb}), \quad (14)$$

де C_T – еквівалентна теплоємність електродвигуна; k_{tr} – коефіцієнт втрат у тяговому режимі; k_{rec} – коефіцієнт втрат у рекуперативному режимі; h – коефіцієнт тепловіддачі.

На відміну від спрощеного врахування нагрівання лише під час тяги, у рівнянні (14) враховано втрати і в режимі рекуперації. Це принципово важливо, оскільки електродвигун у генераторному режимі також має електромагнітні й механічні втрати. За досягнення температурної межі система повинна обмежувати не лише тягове зусилля, а й інтенсивність рекуперативного гальмування, передаючи частину гальмівного моменту механічній гальмівній системі. Така залежність відповідає результатам [3], згідно з якими температура компонентів двигуна безпосередньо обмежує доступну тягову й рекуперативну потужність.

Оптимальне керування визначається шляхом мінімізації функціонала:

$$J = \int_0^{t_f} \left[w_E P_{bat}(t) + w_T \left(\frac{T_m(t) - T_{amb}}{T_{max} - T_{amb}} \right)^2 + w_F F_u^2(t) + w_\Delta \left(\frac{dF_u(t)}{dt} \right)^2 \right] dt \to \min, \quad (15)$$

де w_E, w_T, w_Fі w_Δ – вагові коефіцієнти. Енергетична складова забезпечує мінімізацію витрат заряду з урахуванням поверненої енергії. Теплова складова збільшує значення функціонала за наближення температури до граничного рівня. Складова $F_u^2(t)$ обмежує надмірні тягові та гальмівні зусилля, а складова $(dF_u/dt)^2$ забезпечує плавність керування.

Задача оптимізації розв'язується за умов:

$$s(0) = 0, s(t_f) = S, \quad (16)$$

$$v_{min}(s) \le v(t) \le v_{max}(s), \quad (17)$$

$$SoC_{min} \le SoC(t) \le SoC_{max}, \quad (18)$$

$$T_m(t) \le T_{max}, \quad (19)$$

$$-F_{br,max} \le F_u(t) \le F_{tr,max} . \quad (20)$$

Обмеження (16) гарантує проходження заданої ділянки дороги, умова (17) визначає допустиму швидкість, умова (18) запобігає надмірному розрядженню або зарядженню батареї, умова (19) забезпечує допустимий тепловий режим, а умова (20) враховує технічні можливості електропривода та гальмівної системи. Якщо час проходження маршруту не задається наперед, до функціонала (15) може бути додано складову $w_t t_f$, яка визначатиме компроміс між енергетичною ефективністю та тривалістю руху.

Основний науковий результат полягає в тому, що модель оптимального руху, сформована на базі методології [1] та моделей оптимізації транспортного електропривода [2], поширюється на автономний електромобіль зі змінною масою вантажу. Удосконалення забезпечується введенням стану заряду батареї, рекуперативного потоку енергії, теплової змінної електродвигуна та узагальненого нечіткого коефіцієнта $K_\Sigma(t)$. На відміну від детальних багатокомпонентних моделей, запропонована структура не потребує окремого опису всіх другорядних факторів. Водночас вона зберігає безпосередній фізичний опис маси, дорожнього нахилу, тягової потужності, енергетичного балансу та нагрівання електропривода. Завдяки цьому модель може бути використана для подальшого комп'ютерного моделювання, порівняння різних мас вантажу і профілів дороги та синтезу системи керування, придатної до роботи в реальному часі.

Висновки та перспективи подальших досліджень

За результатами дослідження отримано завершену постановку задачі оптимального керування рухом завантаженого електромобіля. Принциповим результатом є розмежування безпосереднього впливу маси й дорожнього нахилу та коригувальної дії коефіцієнта K_Σ (t),

що усуває дублювання фізичних чинників у рівнянні руху. Сформований коефіцієнт забезпечує єдину оцінку складності поточного режиму та дає змогу змінювати параметри моделі відповідно до сукупного енергетичного й теплового стану електропривода.

Запропонований критерій оптимальності та система обмежень визначають допустиму область керування з урахуванням проходження маршруту, технічних можливостей привода і граничних станів його компонентів. Отримана структура створює основу для чисельного визначення оптимальних тягово-гальмівних режимів за різного завантаження. Подальші дослідження доцільно спрямувати на параметричну ідентифікацію моделі, налаштування нечіткої системи та кількісне порівняння з базовим підходом.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Мокін Б. І., Мокін О. Б. Теорія автоматичного керування. Методологія та практика оптимізації: навч. посіб. Вінниця: ВНТУ, 2013. 210 с.

2. Мокін Б. І., Мокін О. Б. Оптимізація електропривода трамвая в режимах сталого недовантаження та перевантаження. *Вісник Вінницького політехнічного інституту*. 2004. № 6. С. 28–33.

3.Konda M., Hofman T., Salazar M. Energy-optimal design and control of electric powertrains under motor thermal constraints. *arXiv:2111.07711*. 2022. 9 p. DOI: 10.48550/arXiv.2111.07711.

4.Optimal thermal management, charging, and eco-driving of battery electric vehicles/A.Hamednia et al. *arXiv:2205.01560*. 2022. 13 p. DOI: 10.48550/arXiv.2205.01560.

5.Van den Hurk J., Salazar M. Energy-optimal design and control of electric vehicles' transmissions / O.Borsboom et al. *arXiv:2105.05119*. 2021. 10 p. DOI: 10.48550/arXiv.2105.05119.

6.Control and design optimization of an electric vehicle transmission using analytical modeling methods / O. Borsboom et al. *arXiv:2210.13287*. 2022. 8 p. DOI: 10.48550/arXiv.2210.13287.

7.A real-time robust ecological-adaptive cruise control strategy for battery electric vehicles / S.Yu et al. *arXiv:2308.01201*. 2023. 16 p. DOI: 10.48550/arXiv.2308.01201.

8.Optimal endurance race strategies for a fully electric race car under thermal constraints / Van Kampen J. et al.*arXiv:2301.08060*. 2023. 16 p. DOI: 10.48550/arXiv.2301.08060.

9.Borsboom O., Salazar M., Hofman T. Electric motor design optimization: a convex surrogate modeling approach. *arXiv:2204.06422*. 2022. 6 p. DOI: 10.48550/arXiv.2204.06422.

10.Optimal design of electric micromobility vehicles / O.Korzilius et al.*arXiv:2104.10155*. 2021. 8 p. DOI: 10.48550/arXiv.2104.10155.

11.Predictive energy management for battery electric vehicles with hybrid models. Intelligent Transport Systems / Y.-W.Huang et al. *INTSYS 2022. Lecture Notes of the Institute for Computer Sciences, Social Informatics and Telecommunications Engineering*. 2023. Vol. 486. P. 182–196. DOI: 10.1007/978-3-031-30855-0_13.

12.Nanogrid power management based on fuzzy logic controller / W.Issa et al.*arXiv:2112.04068*. 2021. 5 p. DOI: 10.48550/arXiv.2112.04068.

Стаття надійшла до редакції 22.07.2026.
Стаття пройшла рецензування 10.09.2026.
Стаття опублікована 30.09.2026.

Чорний Володимир Сергійович – аспірант кафедри КЕМСК, e-mail: volodymyrchornyi89@gmail.com, ORCID: 0009-0008-9475-8408.
Вінницький національний технічний університет.