

Методика оцінювання ефективності алгоритмів керування двоконтурним індивідуальним електроприводом

О. Г. Нестеренко¹, аспірант

ORCID: <https://orcid.org/0009-0005-0226-1153>; e-mail: Oleksandr.Nesterenko@iee.khpi.edu.ua
Scopus Author ID: 58759054400

Т. Ю. Кунченко¹, кандидат технічних наук, доцент

ORCID: <https://orcid.org/0009-0002-2462-1509>; e-mail: Tetiana.Kunchenko@khpi.edu.ua

¹ Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»

Анотація. У статті розроблено методику оцінювання ефективності алгоритмів керування двоконтурним індивідуальним електроприводом електромобіля у віртуальних і віртуально-фізичних випробуваннях. Актуальність роботи зумовлена тим, що коректне порівняння алгоритмів тягового та протибуксувального керування залежить не лише від їх логіки, а й від прийнятого випробувального сценарію, способу реєстрації енергетичних показників, структури тестового режиму та узгодження між етапами математичного моделювання і стендової перевірки. Метою дослідження є формування відтворюваної методичної основи для порівняння алгоритмів керування в однакових умовах експлуатації, наближених до реальної міської роботи транспортного засобу, з можливістю подальшого перенесення логіки оцінювання з чисельного експерименту до програмно-апаратного контуру. Запропонована методика передбачає послідовне проведення віртуальних і віртуально-фізичних випробувань у межах єдиного підходу до формування тестового режиму та обробки отриманих результатів. Як базовий швидкісний профіль використано міський цикл TRRL 1.1, який відображає характерне чергування розгонів, уповільнень, зупинок і ділянок рівномірного руху. Для відтворення змінних умов взаємодії колеса з дорогою випробувальний сценарій доповнено імовірнісним розподілом типів дорожнього покриття. У запропонованій конфігурації ділянки з пониженими зчипними властивостями задаються стохастичним чергуванням мокрого асфальту і спресованого снігу, що дає змогу моделювати як симетричні, так і асиметричні умови зчеплення для правого і лівого бортів автомобіля та відтворювати більш реалістичні сценарії виникнення буксування.

Систему критеріїв оцінювання сформовано на основі сумарного середнього коефіцієнта корисної дії колеса в тяговому режимі за цикл, сумарного середнього коефіцієнта корисної дії системи електроприводів, загального сумарного коефіцієнта корисної дії тягової системи та витрат електричної енергії за цикл. Такий набір показників дозволяє комплексно враховувати як втрати, пов'язані з електромеханічним перетворенням енергії, так і втрати, обумовлені реалізацією сили тяги та режимами буксування. Показано, що поєднання міського циклу руху зі стохастичною зміною дорожніх умов забезпечує більш інформативну, об'єктивну та відтворювану основу для порівняння алгоритмів керування, ніж спрощені сценарії зі сталими зчипними властивостями. Практичне значення роботи полягає у можливості використання запропонованої методики для попереднього відбору, налагодження та подальшого кількісного порівняння конкретних алгоритмів керування двоконтурним індивідуальним електроприводом у єдиному випробувальному середовищі.

Ключові слова: електромобіль, двоконтурний індивідуальний електропривод, віртуально-фізичні випробування, міський дорожній цикл, коефіцієнт зчеплення, енерговитрати, протибуксувальне керування.

Цитування статті: Нестеренко О. Г., Кунченко Т. Ю. (2026). Методика оцінювання ефективності алгоритмів керування двоконтурним індивідуальним електроприводом. *Електротехнічні та комп'ютерні системи*, 46(122), с.6-13. doi:<https://doi.org/10.15276/eltecs.46.122.2026.1>

Вступ

Підвищення ефективності двоконтурного індивідуального електропривода електромобіля вимагає не лише вдосконалення законів керування, а й побудови відтворюваної процедури їх порівняння. Для систем, що працюють у змінних умовах зчеплення, результат оцінювання істотно залежить від прийнятого випробувального сценарію, способу реєстрації енергетичних показників і узгодження між етапами математичного моделювання та стендової перевірки. Саме тому поряд із розробленням алгоритмів керування постає задача формування методики, придатної для коректного зіставлення їх ефективності в умовах, наближених до реальної міської експлуатації.

Наукова новизна статті полягає в тому, що запропоновано методику оцінювання ефективності алгоритмів керування двоконтурним індивідуальним електроприводом електромобіля, яка поєднує єдину систему енергетичних критеріїв, послідовне проведення віртуальних і віртуально-фізичних випробувань та спеціально сформований міський режим руху на базі циклу TRRL 1.1 з імовірнісним розподілом типів дорожнього покриття.

У статті основну увагу зосереджено не на числовому порівнянні окремих алгоритмів, а на формуванні методичної основи такого порівняння, придатної для подальших відтворюваних числових і стендових досліджень.

1 Постановка проблеми та її зв'язок із важливими науковими і практичними завданнями

Розширення сфери застосування електромобілів і транспортних засобів з електричними трансмісіями посилює вимоги не лише до тягових і динамічних показників привода, а й до енергетичної ефективності його роботи в реальних режимах експлуатації. Для двоконтурного індивідуального електропривода ця задача є особливо актуальною, оскільки електронне керування окремими колесами відкриває широкі можливості для реалізації тяги, протибуксувального обмеження моменту, імітації властивостей диференціальних механізмів і адаптації до змінних дорожніх умов. Разом із цим збільшується і складність об'єктивного порівняння алгоритмів керування, оскільки одна й та сама стратегія може демонструвати різні результати залежно від прийнятого режиму руху, структури моделі, типу покриття та способу реєстрації енергетичних показників.

У практиці досліджень нерідко трапляється ситуація, коли алгоритми оцінюються або в надто спрощених умовах сталого руху, або в ізолюваних режимах прямолінійного розгону. Такий підхід дозволяє виявити окремі особливості роботи регулятора, але не дає достатньо надійної основи для висновку про його загальну ефективність у міському циклі, де постійно чергуються розгін, рекуперативне уповільнення, зупинки та ділянки з різними зчепними властивостями дорожнього покриття. У зв'язку з цим виникає потреба у методиці, яка б поєднувала фізично змістовний тестовий режим, єдину систему критеріїв оцінювання та можливість послідовного переходу від імітаційного дослідження до стендової перевірки.

2 Аналіз останніх досліджень і публікацій та виділення невирішених частин проблеми

У сучасних дослідженнях індивідуального електропривода переважають три напрями. Перший пов'язаний з оглядом і синтезом алгоритмів керування тяговим моментом та обмеження буксування [1–5]. Другий стосується побудови математичних моделей взаємодії колеса з дорогою, які дозволяють описати зміну реакцій у плямі контакту, залежність коефіцієнта зчеплення від буксування та вплив вертикального навантаження на реалізацію тягової сили [6]. Третій напрям охоплює створення цілісних імітаційних моделей електромобіля, у яких поєднані підсистеми динаміки коліс, кузова, шасі та регуляторів тягового моменту [4, 6].

Попри значний обсяг досліджень, питання побудови саме методики порівняльної оцінки ефективності алгоритмів керування висвітлено менш повно. Як правило, акцент робиться або на структурі моделі, або на логіці конкретного алгоритму, тоді як тестовий режим руху та система критеріїв залишаються допоміжними елементами і не розглядаються як самостійний об'єкт дослідження. У результаті порівняння різних алгоритмів часто виконується за неоднакових умов, що ускладнює інтерпретацію результатів і знижує відтворюваність висновків.

Окремою проблемою є недостатнє врахування випадкового характеру зміни дорожніх умов у міській експлуатації [7–11]. Для алгоритмів протибуксувального керування вирішальне значення має не лише швидкісна діаграма руху, а й те, як саме в межах одного циклу чергуються ділянки з різним коефіцієнтом зчеплення [7–11]. Саме тому доцільно розглядати не просто типовий дорожній цикл, а спеціально сформований

режим, у якому закон зміни швидкості поєднано з імовірнісним розподілом типів дорожнього покриття.

Таким чином, у відомих публікаціях переважають або роботи, присвячені синтезу конкретних алгоритмів керування, або дослідження окремих математичних моделей руху й взаємодії колеса з дорогою. Натомість питання побудови відтворюваної методики їх порівняльного оцінювання за єдиним набором енергетичних критеріїв, у спільному тестовому циклі та з можливістю прямого переходу від віртуального до віртуально-фізичного випробування, висвітлено недостатньо. Недостатньо опрацьованим також залишається включення до випробувального сценарію стохастичної зміни зчпних властивостей дорожнього покриття, що є принципово важливим для оцінки алгоритмів двоконтурного індивідуального електропривода в умовах реальної міської експлуатації.

2 Мета статті

Метою статті є розроблення методики оцінювання ефективності алгоритмів керування двоконтурним індивідуальним електроприводом електромобіля у віртуальних і віртуально-фізичних випробуваннях на основі міського циклу TRRL 1.1 та імовірнісного розподілу типів дорожнього покриття.

Для досягнення поставленої мети у статті вирішуються такі задачі: сформувати загальну логіку послідовного проведення віртуальних і віртуально-фізичних випробувань; обґрунтувати систему енергетичних критеріїв оцінювання ефективності алгоритмів керування; обґрунтувати вибір міського циклу TRRL 1.1 як базового швидкісного профілю; розробити спеціальний режим випробувань на основі поєднання циклу TRRL 1.1 з імовірнісним розподілом типів дорожніх покриттів.

3 Виклад основного матеріалу дослідження

3.1 Загальна логіка методики випробувань

Запропонована методика ґрунтується на послідовному переході від чисельного експерименту до випробувань у програмно-апаратному контурі. Її вихідною передумовою є використання комплексу математичних моделей транспортного засобу та його агрегатів разом зі стендовим аналогом двоконтурного індивідуального електропривода, придатним для реалізації технології HILS (hardware in the loop simulation). Така побудова дає змогу спочатку дослідити поведінку

алгоритмів у контрольованому віртуальному середовищі, а після цього перевірити їх у складі системи, де математична та фізична частини працюють узгоджено в єдиному циклі обміну даними.

Методика включає чотири взаємопов'язані етапи. На першому етапі формується режим руху автотранспортного засобу, який має або максимально наближати чисельний експеримент до реальних умов експлуатації, або відповідати типовим випробувальним умовам. На другому етапі виконується віртуальний аналіз ефективності алгоритмів керування в середовищі імітаційного моделювання. Саме на цій стадії доцільно виявляти основні недоліки алгоритмів, перевіряти коректність переходів між режимами та оцінювати вплив параметрів дорожнього покриття на енергетичні показники. На третьому етапі будується віртуально-фізична система, у якій комплекс математичних моделей поєднується зі стендовим обладнанням, що виконує роль аналогів тягових електромашин. На четвертому етапі проводяться віртуально-фізичні випробування та виконується остаточне порівняння алгоритмів за однаковою системою критеріїв.

3.2 Критерії оцінювання ефективності

У межах віртуального аналізу базовим показником запропоновано сумарний середній коефіцієнт корисної дії колеса в тяговому режимі за цикл [6]. Цей показник узагальнює механічні втрати, пов'язані з опором руху та швидкісними втратами в колесі, і визначається виразом

$$\eta_{\Sigma k} = \frac{\sum_{i=1}^n M_{ki} - \sum_{i=1}^n M_{fi}}{\sum_{i=1}^n M_{ki}} \cdot \frac{\sum_{j=1}^n \omega_{koj}}{\sum_{i=1}^n \omega_{ki}} \quad (1)$$

де M_{ki} – i -ті значення крутного моменту на ведучих колесах у правому та лівому силових контурах, Н·м;

M_{fi} – i -ті значення моментів опору в цих контурах, Н·м;

ω_{ki} – i -ті значення частот обертання ведучих коліс, приведених до колеса, c^{-1} ;

ω_{koj} – j -ті значення частот обертання ведених коліс, c^{-1} ;

n – кількість дискретних відліків на інтервалі циклу.

Для віртуально-фізичних випробувань система критеріїв розширюється. Окрім показника $\eta_{\Sigma k}$, вводиться сумарний середній коефіцієнт корисної дії системи електроприводів у тяговому режимі за цикл:

$$\eta_{\Sigma\text{CPeл}} = \frac{N_{\text{мехCP}}}{N_{\text{елCP}}} = \frac{\sum_{i=1}^n (M_{\text{емі}} \cdot \omega_{\text{емі}})}{\sum_{i=1}^n (U_{\text{емі}} \cdot I_{\text{емі}})}, \quad (2)$$

де $N_{\text{мехCP}}$ – середня механічна потужність системи електроприводів за цикл, Вт;

$N_{\text{елCP}}$ – середня електрична потужність системи електроприводів за цикл, Вт;

$M_{\text{емі}}$ – i -ті значення крутного моменту електромашин у правому та лівому силових контурах, Н·м;

$\omega_{\text{емі}}$ – i -ті значення частот обертання електромашин у правому та лівому силових контурах, с⁻¹; $U_{\text{емі}}$ – напруга в i -му електричному колі електромашини, В;

$I_{\text{емі}}$ – струм в i -му електричному колі електромашини, А.

Цей показник дозволяє відокремити втрати, пов'язані безпосередньо з електромеханічним перетворенням енергії, від втрат, що виникають на рівні взаємодії колеса з дорогою.

Інтегральною характеристикою тягової системи приймається загальний сумарний коефіцієнт корисної дії за цикл:

$$\eta_{\Sigma\text{аг}} = \eta_{\Sigma\text{к}} \cdot \eta_{\Sigma\text{CPeл}} \quad (3)$$

У формулах (1)–(3) коефіцієнти корисної дії подано як безрозмірні відносні величини; для представлення результату у відсотках отримане значення множать на 100 %.

Такий підхід дозволяє звести в єдиному показнику вплив як дорожніх умов і режиму буксування, так і енергетичних втрат у самій системі електроприводів. Для практичної оцінки енерговитрат додатково використовується показник витрат електричної енергії (4) в тяговому режимі за цикл:

$$E_{\Sigma\text{CP}} = \left(\sum_{i=1}^n (I_{\text{емі}} \cdot U_{\text{емі}}) \right) \cdot \frac{t_{\text{ц}}}{n} \quad (4)$$

де $I_{\text{емі}}$ – струм в i -му електричному колі електромашини, А;

$U_{\text{емі}}$ – напруга в i -му електричному колі електромашини, В;

$t_{\text{ц}}$ – тривалість циклу, год;

n – кількість дискретних відліків за цикл.

На відміну від ККД, цей показник безпосередньо характеризує абсолютні енергетичні втрати і є зручним для інженерного порівняння алгоритмів у прикладних задачах.

Запропонована система показників є принципово важливою саме для методичної постановки задачі. Якщо обмежитися лише одним критерієм, наприклад енерговитратами, то можна не помітити погіршення тягової реалізації або зби-

льшення механічних втрат у колесі. Якщо ж використовувати тільки коефіцієнт корисної дії електроприводів, то поза увагою залишаться втрати, пов'язані з буксуванням і реалізацією сили тяги. Саме тому поєднання чотирьох критеріїв забезпечує більш об'єктивну основу для порівняння алгоритмів керування.

3.3 Формування спеціального режиму випробувань

Для адекватної оцінки алгоритмів керування недостатньо застосовувати лише умовний режим розгону або стандартне випробування на одному типі покриття. Під час дослідження динаміки автомобіля тестовий цикл повинен не просто задавати функцію швидкості від часу, а й відображати характер експлуатації транспортного засобу в тих умовах, для яких і проєктується система керування. З огляду на це в роботі використано підхід, за яким основою тестового сценарію є типовий міський дорожній цикл, доповнений статистичним описом зміни дорожніх покриттів.

Аналіз типових дорожніх циклів показав, що для розглядуваної задачі найбільш придатним є міський цикл TRRL 1.1, отриманий у результаті статистичних досліджень лабораторії TRL Limited [12]. Обраний цикл не прив'язаний до конкретного міста, а репрезентує узагальнений міський режим руху з характерним чергуванням зупинок, розгонів, ділянок рівномірного руху та рекуперативного уповільнення [12]. Саме така структура є доцільною для оцінювання алгоритмів керування двоконтурним індивідуальним електроприводом, оскільки дозволяє перевірити їх роботу не в одному окремому режимі, а в сукупності переходів, типових для реальної міської експлуатації. Швидкісний профіль прийнятого міського циклу TRRL 1.1 наведено на рис. 1.

У прийнятому сценарії цикл TRRL 1.1 розглядається не ізольовано, а в комбінації з імовірнісним розподілом типів дорожніх покриттів. Такий підхід пов'язаний з тим, що для систем обмеження буксування критичним є не тільки закон зміни швидкості, а й імовірність виникнення ділянок із недостатніми зчіпними властивостями. Для моделювання використовуються два типи покриття, характерні для умов зниженого зчеплення: мокрий асфальт і спресований сніг. Їх поява в межах циклу задається стохастично за допомогою генератора випадкових чисел, причому для умов недостатніх зчіпних властивостей імовірність появи ділянок прийнята рівною 40 % для мокрого асфальту та 60 % для спресованого снігу.

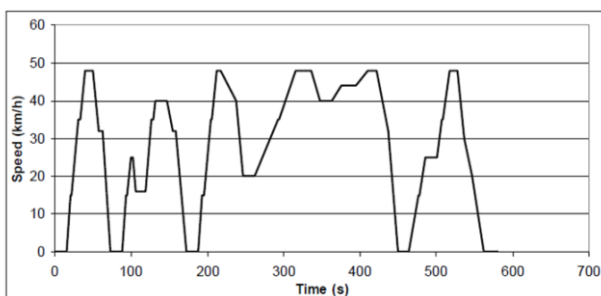


Рис. 1 – Швидкісний профіль міського циклу TRRL 1.1, прийнятого для оцінювання ефективності алгоритмів керування двоконтурним індивідуальним електроприводом

Принципово важливо, що розподіл покриттів може бути асиметричним для правого і лівого бортів автомобіля. Завдяки цьому режим випробувань стає придатним не лише для симетричних випадків зміни коефіцієнта зчеплення, а й для дорожніх ситуацій, де умови контакту коліс однієї осі з дорогою відрізняються між собою. Саме такі сценарії є найбільш інформативними при дослідженні алгоритмів індивідуального керування моментами на колесах.

Для формального задання режиму руху використовуються три вхідні функції (5) віртуальної частини системи випробувань:

$$\begin{aligned} V_a &= V_a(t), \\ P_t &= P_t \text{ (тип покриття),} \\ P_d &= P_d \text{ (довжина ділянки покриття),} \end{aligned} \quad (5)$$

де $V_a(t)$ – функція швидкості автомобіля від часу;

P_t – функція імовірності виникнення типу дорожнього покриття;

P_d – функція імовірності виникнення довжини ділянки покриття.

Структуру спеціального режиму випробувань, у якому цикл TRRL 1.1 поєднано з імовірнісним розподілом типів дорожнього покриття по лівому і правому бортах автомобіля, наведено на рис. 2.

Сукупне використання цих функцій дозволяє відтворити не лише швидкісний профіль руху, а й просторово-часову зміну зчепних властивостей опорної поверхні.

Додатковою перевагою такого режиму є його придатність для використання і на етапі чистого моделювання, і на етапі віртуально-фізичних випробувань. У першому випадку він забезпечує відтворювану основу для попереднього відбору алгоритмів та налагодження параметрів регуляторів. У другому – дозволяє подати на фізичну частину стенда такий самий за логікою

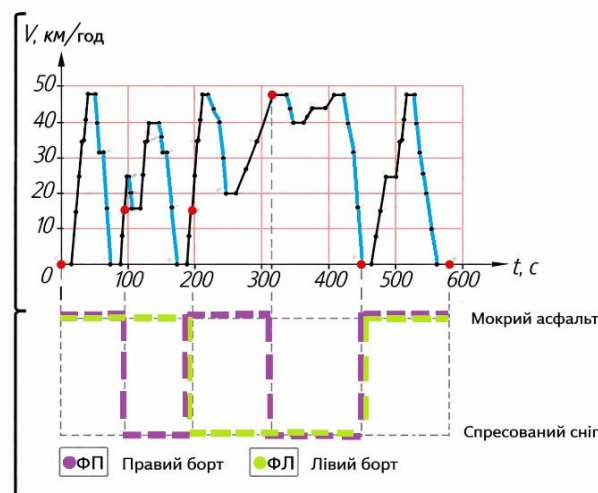


Рис. 2 – Спеціальний режим випробувань: міський цикл TRRL 1.1 у поєднанні з імовірнісним розподілом типів дорожнього покриття по лівому і правому бортах автомобіля

сценарій навантаження, що забезпечує методичну спадкоємність між віртуальним і експериментальними етапами.

3.4 Особливості застосування методики у віртуальних і віртуально-фізичних випробуваннях

У віртуальних випробуваннях запропонована методика дає можливість послідовно відпрацювати логіку алгоритмів керування, аналізувати їх реакцію на зміну коефіцієнта зчеплення, фіксувати появу помилкових перемикачів між режимами та визначати вплив окремих параметрів на інтегральні енергетичні показники [2–5, 7–11]. На цій стадії особливо важливим є те, що всі алгоритми оцінюються в однаковому режимі руху, а отже різниця між ними може бути віднесена саме до особливостей керування, а не до різниці у випробувальному сценарії.

Під час переходу до віртуально-фізичних випробувань ключове значення набуває узгодження між математичною та фізичною частинами системи. З погляду методики, принципово важливо зберегти однаковими не лише критерії оцінювання, а й логіку вхідного збурення: той самий швидкісний цикл, ті самі правила зміни покриття і той самий характер навантаження на контури двоконтурного індивідуального електропривода. За таких умов результати, отримані на стендовому аналогові, можуть бути безпосередньо зіставлені з даними чистого моделювання.

Запропонований підхід забезпечує ще одну важливу методичну перевагу. Він дозволяє розглядати випробування не як набір ізольованих

експериментів, а як єдину багатокрокову процедуру: від розроблення сценарію руху – до реєстрації енергетичних показників та їх підсумкового порівняння. Саме в цьому полягає його відмінність від підходів, де спочатку окремо створюється модель, а вже потім довільно обирається режим для демонстрації її роботи.

Слід окремо підкреслити, що запропонована методика може бути використана не лише для дослідження конкретної розглянутої схеми електромобіля, а й для інженерного порівняння алгоритмів керування в інших конфігураціях електричних трансмісій. Її практичне значення полягає у можливості однаково формувати тестовий сценарій, реєструвати енергетичні показники та переносити логіку оцінювання з імітаційного середовища до віртуально-фізичних випробувань без зміни базових критеріїв. Це робить методику зручною для попереднього відбору алгоритмів перед їх подальшою експериментальною верифікацією.

Висновки

Розроблено методику оцінювання ефективності алгоритмів керування двоконтурним індивідуальним електроприводом електромобіля, яка передбачає послідовне проведення віртуальних і віртуально-фізичних випробувань у межах єдиного підходу до формування тестового сценарію та обробки результатів.

Показано, що для об'єктивного порівняння алгоритмів доцільно використовувати систему з чотирьох критеріїв: сумарний середній коефіцієнт корисної дії колеса в тяговому режимі за цикл, сумарний середній коефіцієнт корисної дії системи електроприводів, загальний сумарний коефіцієнт корисної дії тягової системи та витрати електричної енергії за цикл.

Обґрунтовано використання міського циклу TRRL 1.1 як базового швидкісного профілю для дослідження алгоритмів керування двоконтурним індивідуальним електроприводом в умовах, наближених до реальної міської експлуатації транспортного засобу.

Запропоновано спеціальний режим випробувань, у якому цикл TRRL 1.1 поєднано з імовірнісним розподілом типів дорожніх покриттів. Для умов недостатнього зчеплення прийнято співвідношення 40 % мокрого асфальту та 60 % спресованого снігу, що дозволяє відтворювати більш реалістичні сценарії виникнення буксування.

Показано, що введення стохастичного чергування ділянок покриття, у тому числі з асимет-

рією по бортах автомобіля, розширює дослідницькі можливості методики, робить її придатною для аналізу роботи алгоритмів не лише в симетричних, а й у більш складних дорожніх ситуаціях.

Запропонована методика може бути використана як основа для подальшого кількісного порівняння конкретних алгоритмів керування двоконтурним індивідуальним електроприводом і для переходу від імітаційного моделювання до віртуально-фізичних випробувань. Перспективами подальших досліджень є експериментальна верифікація методики, порівняння конкретних алгоритмів керування за прийнятою системою критеріїв, а також розширення випробувального сценарію на випадки більш складних і реалістичних дорожніх збурень.

Конфлікти інтересів

Автори заявляють про відсутність конфлікту інтересів стосовно цього дослідження, включаючи фінансовий, особистий, авторський чи будь-який інший, який міг би вплинути на дослідження, а також на результати, представлені в статті.

Фінансування

Дослідження проводилося без фінансової підтримки.

Наявність даних

Усі дані доступні в числовій або графічній формі в основному тексті рукопису.

Використання штучного інтелекту

Автори заявляють про використання інструменту штучного інтелекту ChatGPT (OpenAI). Інструмент штучного інтелекту використовувався під час формування структурних елементів «Анотація», «Abstract», «Висновки», а також для мовностилістичного редагування окремих фрагментів тексту. Надані інструментом штучного інтелекту матеріали зменшили вплив лексичних та граматичних помилок.

Внесок авторів

Нестеренко О. Г.: концептуалізація дослідження, розробка методології, формування початкової версії тексту статті, підготовка рисунків і таблиць, формування висновків; *Кунченко Т. Ю.*: наукове консультування, аналіз та інтерпретація матеріалу, редагування основного тексту статті, перевірка термінології, загальне наукове редагування.

Список використаної літератури (References)

1. Fujimoto, H., Amada, J. and Maeda, K. (2012). Review of traction and braking control for electric vehicle. *2012 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference*, pp.1292–1299. doi:<https://doi.org/10.1109/vppc.2012.6422491>.
2. Hu, J.-S., Yin, D. and Hori, Y. (2011). Fault-tolerant traction control of electric vehicles. *Control Engineering Practice*, 19(2), pp.204–213. doi:<https://doi.org/10.1016/j.conengprac.2010.11.012>.
3. R. de Castro, Rui Esteves Araujo and Denise de Freitas (2013). Wheel Slip Control of EVs Based on Sliding Mode Technique With Conditional Integrators. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 60(8), pp.3256–3271. doi:<https://doi.org/10.1109/tie.2012.2202357>.
4. Jalali, M., Khajepour, A., Chen, S. and Litkouhi, B. (2016). Integrated stability and traction control for electric vehicles using model predictive control. *Control Engineering Practice*, 54, pp.256–266. doi:<https://doi.org/10.1016/j.conengprac.2016.06.005>.
5. Kang, S., Chen, J., Qiu, G. and Tong, H. (2023). Slip Ratio Adaptive Control Based on Wheel Angular Velocity for Distributed Drive Electric Vehicles. *World Electric Vehicle Journal*, 14(5), p.119. doi:<https://doi.org/10.3390/wevj14050119>.
6. Pacejka, H. B. (2012) *Tire and Vehicle Dynamics*. 3rd ed. Oxford : Butterworth-Heinemann. doi:<https://doi.org/10.1016/C2010-0-68548-8>
7. Boisvert, M. and Micheau, P. (2016). Estimators of wheel slip for electric vehicles using torque and encoder measurements. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 76-77, pp.665–676. doi:<https://doi.org/10.1016/j.ymsp.2016.02.017>.
8. Heidfeld, H., Schünemann, M. and Kasper, R. (2019). UKF-based State and tire slip estimation for a 4WD electric vehicle. *Vehicle System Dynamics*, 58(10), pp.1479–1496. doi:<https://doi.org/10.1080/00423114.2019.1648836>.
9. Wang, Y., Hu, J., Wang, F., Dong, H., Yan, Y., Ren, Y., Zhou, C. and Yin, G. (2022). Tire Road Friction Coefficient Estimation: Review and Research Perspectives. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 35(1). doi:<https://doi.org/10.1186/s10033-021-00675-z>.
10. Jiang, B., Sharma, N., Liu, Y. and Li, C. (2022). Acceleration-based wheel slip control realized with decentralised electric drivetrain systems. *IET Electrical Systems in Transportation*, 12(2), pp.143–152. doi:<https://doi.org/10.1049/els2.12044>.
11. Vošahlík, D. and Hanis, T. (2024). Real-time estimation of the optimal longitudinal slip ratio for attaining the maximum traction force. *Control Engineering Practice*, 145, pp.105876–105876. doi:<https://doi.org/10.1016/j.conengprac.2024.105876>.
12. Barlow, T. J., Latham, S., McCrae, I. S. and Boulter, P. G. (2009). *A Reference Book of Driving Cycles for Use in the Measurement of Road Vehicle Emissions*. TRL Published Project Report PPR354. Wokingham: Transport Research Laboratory. Available at: <https://www.semanticscholar.org/paper/A-reference-book-of-driving-cycles-for-use-in-the-Barlow-Latham/67c39374704f0970c8b255a89a1a471544743603> [Accessed 30 Apr. 2026]

Отримано (Received) 23.04.2026

Прийнято (Accepted) 04.05.2026

Отримано після доопрацювання (Received after revision) 30.04.2026

Опубліковано (Published) 31.05.2026

Methodology for Evaluating the Efficiency of Control Algorithms for a Dual-channel Individual Electric Drive

Oleksandr Nesterenko¹, postgraduate student

ORCID: <https://orcid.org/0009-0005-0226-1153>; e-mail: Oleksandr.Nesterenko@ieeee.khpi.edu.ua

Scopus Author ID: 58759054400

Tetiana Kunchenko¹, Candidate of Technical Sciences,
Associate Professor

ORCID: <https://orcid.org/0009-0002-2462-1509>; e-mail: Tetiana.Kunchenko@khpi.edu.ua

¹ National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute"

Abstract. *The article develops a methodology for evaluating the efficiency of control algorithms for a dual-channel individual electric drive of an electric vehicle in virtual and virtual-physical tests. The relevance of the study is due to the fact that a correct comparison of traction and anti-slip control algorithms depends not only on their logic, but also on the adopted test scenario, the method of recording energy indicators, the structure of the test mode, and the consistency between the stages of mathematical modeling and bench verification. The aim of the study is to form a reproducible methodological basis for comparing control algorithms under identical operating conditions close to real urban vehicle operation, with the possibility of further transferring the evaluation logic from a numerical experiment to a hardware-software loop. The proposed methodology provides for the sequential implementation of virtual and virtual-physical tests within a unified approach to test-mode formation and result processing. The urban driving cycle TRRL 1.1 is used as the basic speed profile, since it reflects the characteristic alternation of acceleration, deceleration, stops, and steady-speed sections. To reproduce variable wheel-road interaction conditions, the test scenario is supplemented with a probabilistic distribution of road-surface types. In the proposed configuration, low-adhesion sections are represented by stochastic alternation of wet asphalt and compacted snow, which makes it possible to simulate both symmetric and asymmetric adhesion conditions for the right and left sides of the vehicle and to reproduce more realistic wheel-slip scenarios.*

The evaluation criteria system is formed on the basis of total average wheel efficiency in traction mode over the cycle, total average electric-drive-system efficiency, overall total traction-system efficiency, and electric energy consumption over the cycle. This set of indicators makes it possible to account comprehensively for both losses associated with electromechanical energy conversion and losses caused by traction-force realization and slip modes. It is shown that the combination of an urban driving cycle with stochastic variation of road conditions provides a more informative, objective, and reproducible basis for comparing control algorithms than simplified scenarios with constant adhesion properties. The practical significance of the work lies in the possibility of using the proposed methodology for preliminary selection, tuning, and further quantitative comparison of specific control algorithms for a dual-channel individual electric drive within a unified test environment.

Keywords: *electric vehicle, dual-channel individual electric drive, virtual-physical testing, urban driving cycle, tire-road adhesion coefficient, energy consumption, traction control.*

Article citation: Nesterenko, O. H. and Kunchenko, T. Yu. (2026). Methodology for evaluating the efficiency of control algorithms for a dual-channel individual electric drive. *Electrotechnic and Computer Systems*, 2026, 46(122), pp.6-13. doi:<https://doi.org/10.15276/eltecs.46.122.2026.1>

Про авторів (About the authors)



Нестеренко Олександр Григорович, аспірант кафедри автоматизованих електромеханічних систем, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», вул. Кирпичова, 2, Харків, 61002, Україна.
E-mail: Oleksandr.Nesterenko@ieec.khpi.edu.ua, тел. +38 066 504 61 38

Oleksandr Nesterenko, postgraduate student of the Department of Automated Electromechanical Systems, National Technical University “Kharkiv Polytechnic Institute”; 2, Kyrpychova St., Kharkiv, 61002, Ukraine.
E-mail: Oleksandr.Nesterenko@ieec.khpi.edu.ua; ph.: +38 066 504 61 38

ORCID: <https://orcid.org/0009-0005-0226-1153>



Кунченко Тетяна Юрївна, кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри автоматизованих електромеханічних систем, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», вул. Кирпичова, 2, Харків, 61002, Україна.
E-mail: Tetiana.Kunchenko@khpi.edu.ua, тел. +380 50 734 72 02

Tetiana Kunchenko, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Automated Electromechanical Systems, National Technical University “Kharkiv Polytechnic Institute”; 2, Kyrpychova St., Kharkiv, 61002, Ukraine.
E-mail: Tetiana.Kunchenko@khpi.edu.ua; ph.: +380 50 734 72 02

ORCID: <https://orcid.org/0009-0002-2462-1509>