

**Нестеренко Олександр Григорович**, аспірант кафедри автоматизованих електромеханічних систем, +38(066)504-61-38,

Oleksandr.Nesterenko@ieee.khpi.edu.ua, ORCID ID: 0009-0005-0226-1153

*Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»*

*вул. Кирпичова, 2, Харків, 61002*

**Кунченко Тетяна Юрївна**, канд. техн. наук, доцент, доцент кафедри автоматизованих електромеханічних систем, +38(050)734-72-02,

Tetiana.Kunchenko@khpi.edu.ua, ORCID ID: 0009-0002-2462-1509

*Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»*

*вул. Кирпичова, 2, Харків, 61002*

## РЕЗУЛЬТАТИ ВІРТУАЛЬНО-ФІЗИЧНИХ ВИПРОБУВАНЬ АЛГОРИТМІВ КЕРУВАННЯ ДВОКОНТУРНИМ ІНДИВІДУАЛЬНИМ РЕГУЛЬОВАНИМ ЕЛЕКТРОПРИВОДОМ ЕЛЕКТРОМОБІЛЯ

***Анотація.** У статті наведено результати віртуально-фізичних випробувань трьох алгоритмів керування двоконтурним індивідуальним електроприводом електромобіля. Встановлено, що адаптивне регулювання крутних моментів забезпечує найкращі показники: загальний коефіцієнт корисної дії 65,71 %, витрати електричної енергії 99,66 кВт·год за цикл.*

***Ключові слова:** електромобіль, індивідуальний регульований електропривід, двоконтурний електропривід, алгоритми керування, віртуально-фізичні випробування, HILS, крутний момент, коефіцієнт корисної дії, енерговитрати.*

**Nesterenko Oleksandr**, postgraduate student of the Department of Automated Electromechanical Systems, +38(066)504-61-38,

Oleksandr.Nesterenko@ieee.khpi.edu.ua, ORCID ID: 0009-0005-0226-1153

*National Technical University “Kharkiv Polytechnic Institute”*

*2 Kyrpychova St., Kharkiv, 61002*

**Kunchenko Tetiana**, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Automated Electromechanical Systems, +38(050)734-72-02, Tetiana.Kunchenko@khpi.edu.ua, ORCID ID: 0009-0002-2462-1509

Tetiana.Kunchenko@khpi.edu.ua, ORCID ID: 0009-0002-2462-1509

*National Technical University “Kharkiv Polytechnic Institute”*

*2 Kyrpychova St., Kharkiv, 61002*

## RESULTS OF VIRTUAL-PHYSICAL TESTING OF CONTROL ALGORITHMS FOR A DUAL-CHANNEL INDIVIDUAL REGULATED ELECTRIC DRIVE OF AN ELECTRIC VEHICLE

***Abstract.** The paper presents the results of virtual-physical testing of three control algorithms for a dual-channel individual regulated electric drive of an electric vehicle. The tests were performed using a hardware-in-the-loop environment in which a mathematical vehicle model and a driver model interact with a bench analogue of the traction electric drive. The algorithms were compared using integral energy criteria: wheel efficiency, electric-drive system efficiency, overall traction-system efficiency, and electric energy consumption over the test cycle. The results show that the adaptive torque control algorithm provides the best performance among the considered variants. Its overall*

*traction-system efficiency reaches 65.71 %, while electric energy consumption is 99.66 kWh per cycle. The discrepancy between theoretical and experimental torque data does not exceed 10 %, which confirms the suitability of the virtual-physical testing system for comparative evaluation of control algorithms. The obtained results substantiate the use of adaptive torque control as the most effective option for a dual-channel individual electric drive under variable road-adhesion conditions.*

**Keywords:** *electric vehicle, individual regulated electric drive, dual-channel electric drive, control algorithms, virtual-physical testing, HILS, torque, efficiency, energy consumption.*

**Вступ.** Підвищення ефективності електромобіля з індивідуальним регульованим електроприводом залежить не лише від характеристик електромашин, силових перетворювачів і накопичувача енергії, а й від алгоритму керування потоками потужності між ведучими колесами. Для двоконтурного електроприводу ця задача є особливо важливою, оскільки правий і лівий силові контури можуть працювати за різних зчіпних умов, а отже потребують узгодженого, але не обов'язково симетричного формування крутних моментів [1, 2].

У міському циклі руху електромобіль постійно переходить між режимами рушання, розгону, руху зі сталою швидкістю, уповільнення та зупинки. Якщо при цьому дорожнє покриття має змінні або неоднорідні зчіпні властивості, нераціональний розподіл крутних моментів може призводити до буксування, швидкісних втрат у колесі, зниження корисної тяги та збільшення витрат електричної енергії. Тому алгоритм керування повинен не лише реалізовувати запит водія на тягу, а й підтримувати роботу електроприводу в області ефективної реалізації тягового моменту [3, 4].

Логіка дослідження таких алгоритмів передбачає послідовний перехід від математичної моделі до методики оцінювання, від методики – до віртуально-фізичної випробувальної системи, а від неї – до порівняльних стендових результатів. Математичне моделювання дає змогу попередньо перевірити структуру алгоритмів, однак воно не відтворює повною мірою роботу реальних електромашин, інверторів, вимірювальних каналів, навантажувальних пристроїв і апаратних контурів керування. Натомість натурні дорожні випробування складно проводити в однакових і повторюваних умовах, особливо за необхідності моделювання різних типів покриття для правого і лівого бортів автомобіля.

Компромісним рішенням є застосування системи віртуально-фізичних випробувань, у якій математична модель електромобіля працює разом із фізичним стендовим аналогом двоконтурного індивідуального електроприводу. У такій системі віртуальна частина формує дорожній сценарій, модель водія і розрахункові умови руху, а фізична частина відтворює електромеханічні процеси в силових контурах. Це дозволяє порівнювати алгоритми керування не тільки за результатами імітаційного моделювання, а й за фактичними механічними та електричними параметрами, зареєстрованими під час стендових випробувань [5, 6].

Наукова новизна роботи полягає в узагальненні та порівняльній інтерпретації результатів віртуально-фізичних випробувань трьох алгоритмів керування двоконтурним індивідуальним електроприводом за єдиною системою енергетичних критеріїв із перевіркою збіжності теоретичних і експериментальних даних за крутними моментами силових контурів.

**Аналіз останніх досліджень та публікацій.** У сучасних дослідженнях індивідуального електроприводу електромобіля основну увагу приділяють трьом взаємопов'язаним напрямам: синтезу алгоритмів керування тяговим моментом [7–11], математичному моделюванню взаємодії колеса з дорожнім покриттям та оцінюванню стану контакту [3, 4, 12–14], а також побудові систем віртуальних і віртуально-фізичних випробувань [5, 6]. У межах першого напрямку розглядаються алгоритми обмеження буксування, адаптивного перерозподілу моментів і імітації властивостей диференціальних механізмів. Другий напрям забезпечує розрахункову основу для визначення реакцій у плямі контакту, коефіцієнта буксування та втрат, пов'язаних із реалізацією тяги. Третій напрям пов'язаний із переходом від чистого моделювання до програмно-апаратної перевірки алгоритмів у замкненому контурі.

Водночас окремого значення набуває не лише розроблення моделей або алгоритмів, а й порівняльна інтерпретація результатів їх стендової перевірки за єдиною системою енергетичних критеріїв [5, 6, 10, 11]. Саме тому невирішеною частиною проблеми є узагальнення результатів віртуально-фізичних випробувань

відібраних алгоритмів керування двоконтурним індивідуальним електроприводом в однаковому випробувальному циклі та з однаковими критеріями оцінювання.

**Мета статті.** Метою статті є порівняльна оцінка результатів віртуально-фізичних стендових випробувань алгоритмів керування двоконтурним індивідуальним регульованим електроприводом електромобіля за інтегральними енергетичними критеріями.

Для досягнення поставленої мети вирішуються такі задачі:

- коротко описати експериментальну віртуально-фізичну систему, використану для стендової перевірки алгоритмів;
- визначити систему критеріїв оцінювання ефективності алгоритмів керування;
- порівняти три алгоритми керування крутними моментами двоконтурного електроприводу;
- перевірити збіжність теоретичних і експериментальних даних за крутними моментами силових контурів;
- визначити алгоритм, який забезпечує найкращі інтегральні показники ефективності в прийнятому випробувальному циклі.

**Матеріали та методи.** Об'єктом дослідження є двоконтурний індивідуальний регульований електропривід електромобіля, у якому правий і лівий силові контури можуть керуватися незалежно. Предметом дослідження є ефективність алгоритмів формування та розподілу крутних моментів у цих контурах під час руху за змінних дорожніх умов.

Випробування виконано з використанням системи віртуально-фізичних випробувань, у якій математична модель електромобіля та модель водія взаємодіють зі стендовим аналогом двоконтурного індивідуального електроприводу. У цій статті конструктивна структура платформи не розглядається як окремий предмет дослідження, оскільки основну увагу зосереджено на результатах порівняльних випробувань алгоритмів керування. Тому опис випробувальної системи подано лише в обсязі, необхідному для розуміння експериментальної бази та інтерпретації отриманих результатів. У

межах цієї роботи наведено принципову схему навантажувального стенда, яка характеризує фізичну частину системи та умови отримання експериментальних даних. Принципову схему стенда для випробування електромашин двоконтурного індивідуального електроприводу наведено на рис. 1.

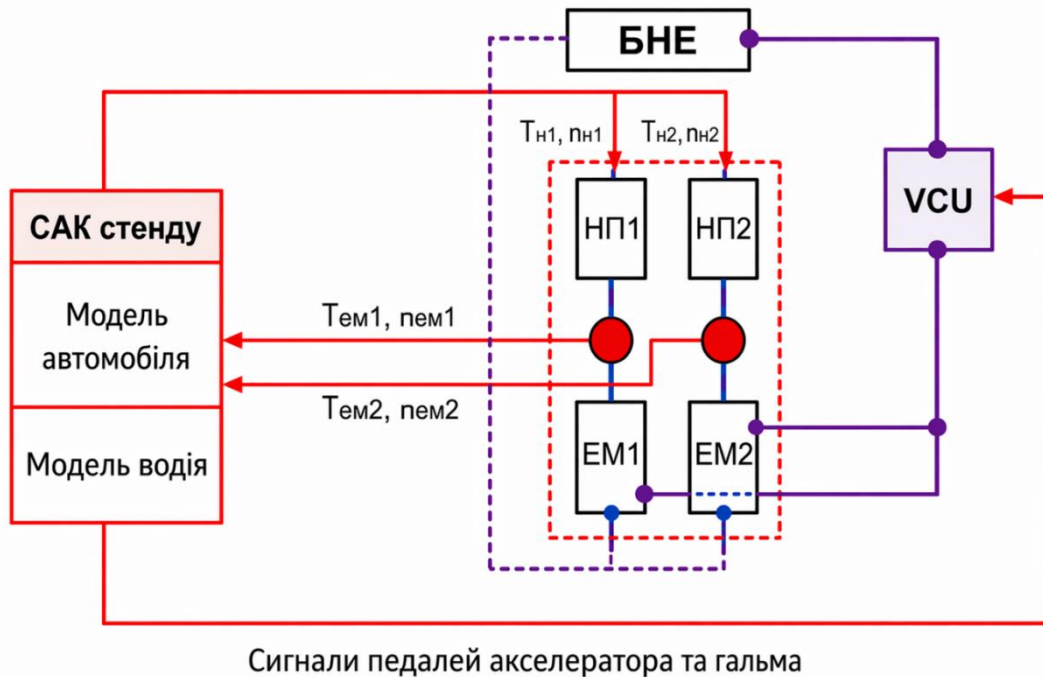


Рисунок 1 – Принципова схема навантажувального стенда для випробування електромашин:

БНЕ – буферний накопичувач енергії; ЕМ – електромашини; НП – навантажувальні пристрої; VCU – мікропроцесорний блок керування; САК – система автоматичного керування;  $T_{ем1}$  і  $n_{ем1}$ ,  $T_{ем2}$  і  $n_{ем2}$  – крутні моменти та частоти обертання електромашин відповідно;  $T_{н1}$  і  $n_{н1}$ ,  $T_{н2}$  і  $n_{н2}$  – крутні моменти та частоти обертання навантажувальних пристроїв відповідно.

Як видно з рис. 1, фізична частина системи містить два паралельні силові контури, що відповідають імітаційним контурам правого і лівого ведучих коліс. Кожен контур включає електромашину об'єкта дослідження, вимірювальний пристрій і навантажувальний пристрій. Така побудова дає змогу окремо відтворювати роботу правого і лівого приводних каналів та порівнювати їх реакцію на зміну режиму руху і дорожніх умов. Віртуальна частина формує швидкісний режим, дорожні умови, тип покриття та довжину ділянок покриття, а синхронізація фізичної та віртуальної частин забезпечується через контури зворотного зв'язку за крутними моментами та частотами обертання.

Стендова система включає два паралельні силові контури, буферний накопичувач енергії, систему автоматичного керування, мікропроцесорний блок VCU, інвертори електромашин, модуль збору даних і налагоджувальне програмне забезпечення. Наявність двох незалежних силових контурів є принциповою для цієї роботи, оскільки досліджувані алгоритми відрізняються саме логікою формування та розподілу крутних моментів між правим і лівим каналами. Використання технології апаратно-програмного моделювання Hardware-in-the-loop simulation (HILS) дозволяє замінити частину об'єкта керування та зовнішнього середовища математичною моделлю, тоді як реальні електромашини та навантажувальні пристрої працюють у замкненому апаратно-програмному контурі [5, 6].

Під час випробувань реєструвалися основні механічні, електричні та теплові параметри: крутні моменти окремих силових контурів, частоти обертання, напруги, керувальні струми, температури електромашин на вході та виході систем охолодження. Реєстрація цих параметрів забезпечувала можливість подальшого розрахунку інтегральних енергетичних критеріїв і зіставлення теоретичних та експериментальних залежностей. Крутні моменти вимірювалися тензометричними муфтами, частоти обертання – імпульсними безконтактними датчиками, електричні параметри – датчиками струму та напруги.

Для порівняльного аналізу розглядалися три алгоритми керування крутними моментами, які відображають різні принципи формування моментів у двоконтурному індивідуальному електроприводі. Далі в тексті вони позначаються змістовими скороченнями: АК-ДПТ-П, АК-ІЗВ та АК-АРМ, де АК – алгоритм керування. Їх перелік наведено в табл. 1.

Ефективність алгоритмів оцінювалася за чотирма інтегральними критеріями, прийнятими у методиці порівняльного аналізу: сумарним середнім коефіцієнтом корисної дії колеса в тяговому режимі за цикл, сумарним середнім коефіцієнтом корисної дії системи електроприводів, загальним сумарним коефіцієнтом корисної дії тягової системи та витратами електричної енергії за цикл.

Таблиця 1 – Алгоритми керування, прийняті для віртуально-фізичних випробувань

Позначення	Алгоритм керування	Технічна характеристика алгоритму
АК-ДПТ-П	Регулювання крутних моментів за принципом роботи диференціала підвищеного тертя з постійним коефіцієнтом блокування	Імітація диференціала підвищеного тертя з постійним коефіцієнтом блокування 1,5
АК-ІЗВ	Індивідуальне регулювання крутних моментів за зчпними властивостями	Окреме формування моментів відповідно до зчпних властивостей правого і лівого коліс
АК-АРМ	Адаптивне регулювання крутних моментів	Формування моментів відповідно до поточних умов реалізації тяги в правому і лівому контурах

Сумарний середній коефіцієнт корисної дії колеса характеризує силові та швидкісні втрати в колесі. Сумарний середній коефіцієнт корисної дії системи електроприводів характеризує ефективність перетворення електричної енергії в механічну. Загальний сумарний коефіцієнт корисної дії тягової системи є інтегральним показником, що враховує як втрати на рівні колеса, так і втрати в системі електроприводів. Витрати електричної енергії за цикл визначають абсолютний обсяг енергії, спожитої електроприводом у тяговому режимі.

У цій статті зазначені критерії використовуються для аналізу експериментальних результатів без повторного виведення розрахункових формул. Математичний апарат їх визначення, послідовність розрахунку та логіка застосування розглядаються як складові окремої методики оцінювання ефективності алгоритмів керування індивідуальним електроприводом. Такий підхід дозволяє уникнути дублювання методичної частини та зосередити увагу цієї роботи на результатах порівняльних віртуально-фізичних випробувань.

Оцінювання виконувалося не як статистичне узагальнення випадкової вибірки, а як порівняння інтегральних енергетичних показників, отриманих для однакового відтворюваного випробувального циклу.

**Результати віртуально-фізичних випробувань.** За результатами віртуально-фізичних випробувань для кожного алгоритму керування отримано залежності крутних моментів у правому і лівому силових контурах, частот обертання, струмів і напруг електромашин у тяговому режимі. Повний набір графіків для всіх алгоритмів керування має допоміжний характер, тому в цій

статті основну увагу зосереджено на інтегральних результатах і порівняльній оцінці ефективності.

АК-ДПТ-П, побудований за принципом диференціала підвищеного тертя з постійним коефіцієнтом блокування 1,5, забезпечив сумарний середній коефіцієнт корисної дії колеса 89,60 %, коефіцієнт корисної дії системи електроприводів 61,10 %, а загальний коефіцієнт корисної дії 54,75 %. Витрати електричної енергії за цикл становлять 107,01 кВт·год. Отриманий результат свідчить, що введення властивостей підвищеного тертя покращує реалізацію тяги на рівні колеса, однак не забезпечує такого рівня ефективності електромеханічної частини, як адаптивне регулювання моментів.

АК-ІЗВ, тобто індивідуальне регулювання за зчіпними властивостями, забезпечив сумарний середній коефіцієнт корисної дії колеса 84,37 %, коефіцієнт корисної дії системи електроприводів 57,98 % і загальний коефіцієнт корисної дії 48,92 %. Водночас саме для цього алгоритму серед розглянутих отримано найбільші витрати електричної енергії – 110,12 кВт·год. Це показує, що сам по собі індивідуальний характер регулювання не гарантує найкращої енергетичної ефективності, якщо логіка формування моментів не забезпечує належного узгодження між правим і лівим силовими контурами.

Для АК-АРМ, тобто адаптивного регулювання крутних моментів, отримано найвищі значення коефіцієнтів корисної дії серед розглянутих алгоритмів. Сумарний середній коефіцієнт корисної дії колеса становить 95,95 %, сумарний середній коефіцієнт корисної дії системи електроприводів – 68,48 %, а загальний коефіцієнт корисної дії тягової системи – 65,71 %. Витрати електричної енергії за цикл становлять 99,66 кВт·год. Такий результат свідчить про найефективніше узгодження формування крутних моментів з поточними умовами реалізації тяги.

Узагальнені результати розрахунку оціночних критеріїв наведено в табл. 2.

Таблиця 2 – Результати розрахунку оціночних критеріїв ефективності алгоритмів керування

Критерій	АК-ДПТ-П	АК-ІЗВ	АК-АРМ
$\eta_{\Sigma k}, \%$	89,60	84,37	95,95
$\eta_{\Sigma \text{СРел}}, \%$	61,10	57,98	68,48
$\eta_{\Sigma \text{заг}}, \%$	54,75	48,92	65,71
$E_{\Sigma \text{СР}}, \text{кВт}\cdot\text{год}$	107,01	110,12	99,66

Дані табл. 2 показують, що алгоритм адаптивного регулювання моментів АК-АРМ має перевагу за всіма інтегральними критеріями. Найближчим до нього серед двох альтернатив є АК-ДПТ-П, особливо за сумарним середнім коефіцієнтом корисної дії колеса та витратами електричної енергії. Водночас навіть у цьому випадку загальний коефіцієнт корисної дії АК-ДПТ-П нижчий на 10,96 відсоткових пункта, а витрати електричної енергії більші на 7,35 кВт·год за цикл.

**Перевірка збіжності теоретичних і експериментальних даних.** Важливим етапом дослідження було порівняння теоретичних і експериментальних даних, отриманих за результатами віртуально-фізичних випробувань. Основними параметрами для такого зіставлення були крутні моменти в контурах правого і лівого ведучих коліс. Саме ці величини безпосередньо характеризують узгодженість математичної моделі, стендового обладнання та алгоритму керування. Для ілюстрації збіжності на рис. 2 наведено порівняння теоретичної та експериментальної залежностей крутного моменту  $M_{\Pi}$  у правому силовому контурі.

Аналіз наведених залежностей показав високу узгодженість результатів моделювання та стендових даних. Розбіжність між теоретичними й експериментальними результатами не перевищує 10 %. Такий рівень відхилення є прийнятним для порівняльного аналізу алгоритмів керування, оскільки випробування виконувалися за однаковим сценарієм, а оцінювання здійснювалося за єдиною системою критеріїв [5, 6].

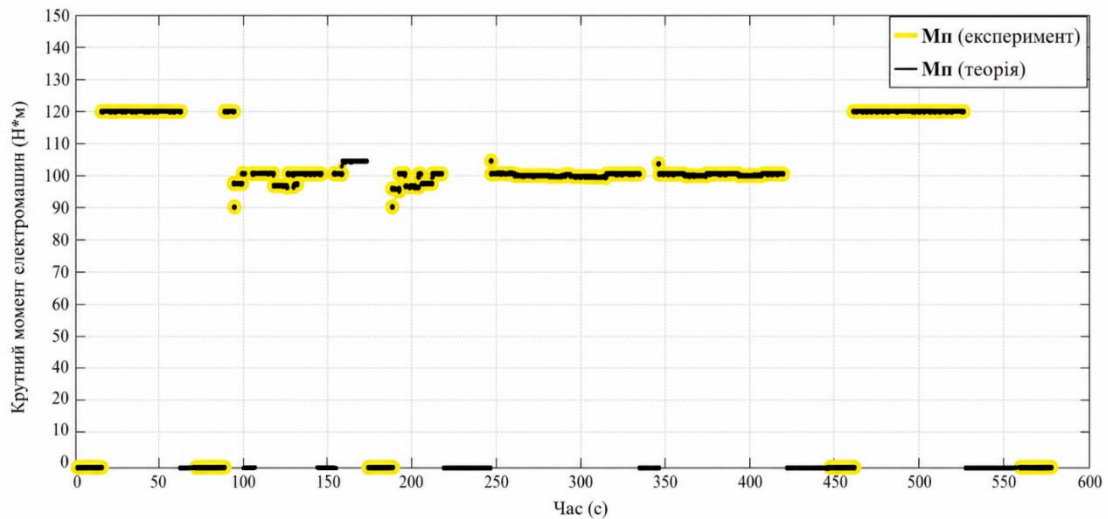


Рисунок 2 – Порівняння теоретичної та експериментальної залежностей крутного моменту  $M_{п}$  у правому силовому контурі в тяговому режимі за цикл

Розбіжність результатів обумовлена похибками вимірювальних приладів і стендового обладнання. Достовірність отриманих даних забезпечується тим, що математичні моделі побудовано на основі рівнянь динаміки, механіки та теорії автомобіля, а експериментальні результати отримано з використанням тарованих, повірених і атестованих вимірювальних засобів.

Отримана збіжність підтверджує, що система віртуально-фізичних випробувань придатна для відтворення дорожнього циклу в поєднанні з імовірнісним розподілом типів дорожнього покриття по різних бортах транспортного засобу. Це дає підстави використовувати таку систему для подальшого порівняння алгоритмів керування індивідуальним електроприводом.

**Порівняльний аналіз ефективності алгоритмів.** Порівняльна оцінка результатів показує, що головна перевага АК-АРМ полягає в одночасному покращенні всіх трьох енергетичних рівнів: реалізації тяги на колесі, ефективності електроприводів і загального коефіцієнта корисної дії тягової системи. Це відрізняє адаптивне регулювання від алгоритмів, які імітують роботу механічних диференціалів або використовують індивідуальне регулювання лише за зчипними властивостями [7–11].

Отримані результати можна пояснити тим, що АК-АРМ ефективніше узгоджує крутні моменти з поточними умовами реалізації тяги. Завдяки цьому зменшуються втрати, пов'язані з буксуванням і нерациональним розподілом

моменту між правим та лівим контурами. На відміну від схем, що мають наперед задану диференціальну або індивідуальну логіку, адаптивний алгоритм змінює формування моментів відповідно до поточного стану правого і лівого силових контурів.

АК-ДПТ-П демонструє вищу реалізацію тяги на рівні колеса порівняно з АК-ІЗВ. Для нього сумарний середній коефіцієнт корисної дії колеса становить 89,60 %, тоді як для АК-ІЗВ – 84,37 %. Однак за коефіцієнтом корисної дії системи електроприводів і загальним коефіцієнтом корисної дії обидва алгоритми поступаються АК-АРМ. Це свідчить, що імітація диференціала підвищеного тертя з постійним коефіцієнтом блокування покращує силову реалізацію тяги, але не забезпечує такого рівня енергетичної ефективності, як адаптивне регулювання моментів.

АК-ІЗВ має нижчі інтегральні показники порівняно з АК-ДПТ-П і АК-АРМ. Зокрема, для цього алгоритму отримано найнижчий серед розглянутих загальний коефіцієнт корисної дії – 48,92 %, а також найбільші витрати електричної енергії – 110,12 кВт·год за цикл. Це підтверджує, що окреме формування моментів за зчіпними властивостями потребує додаткового узгодження з енергетичними критеріями роботи двоконтурного електроприводу.

Адаптивне регулювання крутних моментів забезпечує найменші витрати електричної енергії – 99,66 кВт·год за цикл. Порівняно з АК-ДПТ-П економія становить 7,35 кВт·год, а порівняно з АК-ІЗВ – 10,46 кВт·год. Отже, перевага АК-АРМ проявляється не лише у відносних коефіцієнтах корисної дії, а й в абсолютному зменшенні споживання електричної енергії.

За прийнятим параметром порівняльної ефективності перевага АК-АРМ над іншими розглянутими алгоритмами керування становить: за сумарним середнім коефіцієнтом корисної дії колеса – 6,6...12,1 %, за сумарним середнім коефіцієнтом корисної дії системи електроприводів – 10,8...15,3 %, а за загальним коефіцієнтом корисної дії тягової системи – 16,7...25,6 %. Витрати електричної енергії при цьому зменшуються на 7,4...10,5 кВт·год за цикл.

Таким чином, для двоконтурного індивідуального електроприводу найбільш ефективним із розглянутих є адаптивне формування крутних моментів з

урахуванням поточного режиму руху та можливостей реалізації тяги в кожному силовому контурі.

**Обговорення результатів.** Отримані результати мають кілька важливих наслідків для розроблення алгоритмів керування електромобілями з індивідуальним електроприводом. По-перше, вони підтверджують, що енергетична ефективність такої системи не може оцінюватися лише за коефіцієнтом корисної дії електромашин або силових перетворювачів. Втрати на рівні колеса, пов'язані з буксуванням і нераціональною реалізацією тяги, можуть істотно впливати на загальний результат [3, 4, 12–14].

По-друге, результати показують, що алгоритми з наперед заданою диференціальною або індивідуальною логікою мають обмежену ефективність у змінних дорожніх умовах. Диференціал підвищеного тертя з постійним коефіцієнтом блокування покращує реалізацію тяги на рівні колеса, а індивідуальне регулювання за зчіпними властивостями дає змогу окремо формувати моменти в правому та лівому контурах. Однак найкращий ефект досягається тоді, коли алгоритм не просто відтворює наперед задану механічну характеристику або локальну логіку регулювання за зчіпними властивостями, а змінює крутні моменти відповідно до поточного стану системи.

По-третє, віртуально-фізична перевірка дала змогу підтвердити не лише розрахункову перевагу АК-АРМ, а й працездатність алгоритму в апаратно-програмному контурі. Це має принципове значення, оскільки реальні електромашини, інвертори, вимірювальні пристрої та навантажувальні машини вносять у систему додаткові похибки й обмеження, які не завжди проявляються в чистому імітаційному моделюванні [5, 6].

Практичне значення отриманих результатів полягає в тому, що вони дозволяють обґрунтовано вибрати АК-АРМ як пріоритетний алгоритм для подальшого налагодження і програмно-апаратної реалізації в системах двоконтурного індивідуального електроприводу, що працюють у міському циклі на покриттях зі змінними зчіпними властивостями.

**Висновки.** Проведено порівняльну оцінку результатів віртуально-фізичних стендових випробувань трьох алгоритмів керування двоконтурним

індивідуальним регульованим електроприводом електромобіля. Дослідження виконано в апаратно-програмному контурі HILS, де математична модель електромобіля і модель водія взаємодіють зі стендовим аналогом двоконтурного електроприводу.

Показано, що система віртуально-фізичних випробувань здатна відтворювати дорожній цикл у поєднанні з імовірнісним розподілом типів дорожнього покриття по різних бортах транспортного засобу. Це дозволяє перевіряти алгоритми керування в умовах, наближених до реальної міської експлуатації зі змінними зчіпними властивостями.

Встановлено високу збіжність теоретичних і експериментальних даних за крутними моментами правого і лівого силових контурів. Розбіжність результатів не перевищує 10 %, що підтверджує достовірність математичної моделі та придатність стендової системи для порівняльної перевірки алгоритмів керування.

Найкращі інтегральні показники отримано для АК-АРМ – адаптивного регулювання крутних моментів. Для цього алгоритму керування сумарний середній коефіцієнт корисної дії колеса становить 95,95 %, сумарний середній коефіцієнт корисної дії системи електроприводів – 68,48 %, загальний коефіцієнт корисної дії тягової системи – 65,71 %, а витрати електричної енергії за цикл – 99,66 кВт·год.

За прийнятим параметром порівняльної ефективності перевага АК-АРМ над іншими розглянутими алгоритмами керування становить: за сумарним середнім коефіцієнтом корисної дії колеса – 6,6...12,1 %, за сумарним середнім коефіцієнтом корисної дії системи електроприводів – 10,8...15,3 %, за загальним коефіцієнтом корисної дії тягової системи – 16,7...25,6 %. Витрати електричної енергії при цьому зменшуються на 7,4...10,5 кВт·год за цикл.

За загальним коефіцієнтом корисної дії найнижчий результат серед розглянутих алгоритмів отримано для АК-ІЗВ – індивідуального регулювання за зчіпними властивостями. Цей самий алгоритм має найбільші абсолютні витрати електричної енергії за цикл. Це підтверджує необхідність багатокритеріального оцінювання алгоритмів, а не порівняння лише за одним показником.

Отримані результати підтверджують доцільність застосування адаптивного регулювання крутних моментів як найбільш ефективного з розглянутих алгоритмів керування двоконтурним індивідуальним електроприводом електромобіля в умовах руху за змінних зчіпних властивостей дорожнього покриття.

### БІБЛІОГРАФІЧНИЙ СПИСОК:

1. Zhang X. *Modeling and Dynamics Control for Distributed Drive Electric Vehicles*. Singapore : Springer, 2021. DOI: 10.1007/978-3-658-32213-7.
2. Katsuyama E., Yamakado M., Abe M. A state-of-the-art review: toward a novel vehicle dynamics control concept taking the driveline of electric vehicles into account as promising control actuators. *Vehicle System Dynamics*. 2021. Vol. 59. no. 7. P. 976–1025. DOI: 10.1080/00423114.2021.1916048.
3. Rajamani R. *Vehicle Dynamics and Control*. 2nd ed. New York : Springer, 2012. 498 p. DOI: 10.1007/978-1-4614-1433-9.
4. Pacejka H. B. *Tire and Vehicle Dynamics*. 3rd ed. Oxford : Butterworth-Heinemann, 2012. 672 p. DOI: 10.1016/C2010-0-68548-8.
5. Lin C., Zhang L. Hardware-in-the-loop simulation and its application in electric vehicle development. *2008 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference*. Harbin, China, 2008. P. 1–6. DOI: 10.1109/VPPC.2008.4677560.
6. Kasri A., Ouari K., Belkhier Y., Oubelaid A., Bajaj M., Tuka M. B. Real-time and hardware in the loop validation of electric vehicle performance: robust nonlinear predictive speed and currents control based on space vector modulation for PMSM. *Results in Engineering*, 2024. Vol. 22. Art. 102223. DOI: 10.1016/j.rineng.2024.102223.
7. Fujimoto H., Amada J., Maeda K. Review of traction and braking control for electric vehicle. *2012 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference*. Seoul, South Korea, 2012. P. 1292–1299. DOI: 10.1109/VPPC.2012.6422491.
8. Hu J.-S., Yin D., Hori Y. Fault-tolerant traction control of electric vehicles. *Control Engineering Practice*. 2011. Vol. 19. no. 2. P. 204–213. DOI: 10.1016/j.conengprac.2010.11.012.
9. de Castro R., Araújo R. E., Freitas D. Wheel slip control of EVs based on sliding mode technique with conditional integrators. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2013. Vol. 60. no. 8. P. 3256–3271. DOI: 10.1109/TIE.2012.2202357.
10. Ding X., Wang Z., Zhang L. Hybrid control-based acceleration slip regulation for four-wheel-independent-actuated electric vehicles. *IEEE Transactions on Transportation Electrification*, 2021. Vol. 7. no. 3. P. 1976–1989. DOI: 10.1109/TTE.2020.3048405.
11. Jalali M., Khajepour A., Chen S.-K., Litkouhi B. Integrated stability and traction control for electric vehicles using model predictive control. *Control Engineering Practice*, 2016. Vol. 54. P. 256–266. DOI: 10.1016/j.conengprac.2016.06.005.
12. Heidfeld H., Schünemann M., Kasper R. UKF-based state and tire slip estimation for a 4WD electric vehicle. *Vehicle System Dynamics*, 2020. Vol. 58. no. 10. P. 1479–1496. DOI: 10.1080/00423114.2019.1648836.
13. Boisvert M., Micheau P. Estimators of wheel slip for electric vehicles using torque and encoder measurements. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2016. Vol. 76–77. P. 665–676. DOI: 10.1016/j.ymssp.2016.02.017.
14. Wang Y., Hu J., Wang F., Dong H., Yan Y., Ren Y., Zhou C., Yin G. Tire road friction coefficient estimation: review and research perspectives. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 2022. Vol. 35. Art. 6. DOI: 10.1186/s10033-021-00675-z.

## REFERENCES:

1. Zhang X. *Modeling and Dynamics Control for Distributed Drive Electric Vehicles*. Singapore : Springer, 2021. DOI: 10.1007/978-3-658-32213-7.
2. Katsuyama E., Yamakado M., Abe M. A state-of-the-art review: toward a novel vehicle dynamics control concept taking the driveline of electric vehicles into account as promising control actuators. *Vehicle System Dynamics*. 2021. Vol. 59. no. 7. P. 976–1025. DOI: 10.1080/00423114.2021.1916048.
3. Rajamani R. *Vehicle Dynamics and Control*. 2nd ed. New York : Springer, 2012. 498 p. DOI: 10.1007/978-1-4614-1433-9.
4. Pacejka H. B. *Tire and Vehicle Dynamics*. 3rd ed. Oxford : Butterworth-Heinemann, 2012. 672 p. DOI: 10.1016/C2010-0-68548-8.
5. Lin C., Zhang L. Hardware-in-the-loop simulation and its application in electric vehicle development. *2008 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference*. Harbin, China, 2008. P. 1–6. DOI: 10.1109/VPPC.2008.4677560.
6. Kasri A., Ouari K., Belkhier Y., Oubelaid A., Bajaj M., Tuka M. B. Real-time and hardware in the loop validation of electric vehicle performance: robust nonlinear predictive speed and currents control based on space vector modulation for PMSM. *Results in Engineering*, 2024. Vol. 22. Art. 102223. DOI: 10.1016/j.rineng.2024.102223.
7. Fujimoto H., Amada J., Maeda K. Review of traction and braking control for electric vehicle. *2012 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference*. Seoul, South Korea, 2012. P. 1292–1299. DOI: 10.1109/VPPC.2012.6422491.
8. Hu J.-S., Yin D., Hori Y. Fault-tolerant traction control of electric vehicles. *Control Engineering Practice*. 2011. Vol. 19. no. 2. P. 204–213. DOI: 10.1016/j.conengprac.2010.11.012.
9. de Castro R., Araújo R. E., Freitas D. Wheel slip control of EVs based on sliding mode technique with conditional integrators. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2013. Vol. 60. no. 8. P. 3256–3271. DOI: 10.1109/TIE.2012.2202357.
10. Ding X., Wang Z., Zhang L. Hybrid control-based acceleration slip regulation for four-wheel-independent-actuated electric vehicles. *IEEE Transactions on Transportation Electrification*, 2021. Vol. 7. no. 3. P. 1976–1989. DOI: 10.1109/TTE.2020.3048405.
11. Jalali M., Khajepour A., Chen S.-K., Litkouhi B. Integrated stability and traction control for electric vehicles using model predictive control. *Control Engineering Practice*, 2016. Vol. 54. P. 256–266. DOI: 10.1016/j.conengprac.2016.06.005.
12. Heidfeld H., Schünemann M., Kasper R. UKF-based state and tire slip estimation for a 4WD electric vehicle. *Vehicle System Dynamics*, 2020. Vol. 58. no. 10. P. 1479–1496. DOI: 10.1080/00423114.2019.1648836.
13. Boisvert M., Micheau P. Estimators of wheel slip for electric vehicles using torque and encoder measurements. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2016. Vol. 76–77. P. 665–676. DOI: 10.1016/j.ymsp.2016.02.017.
14. Wang Y., Hu J., Wang F., Dong H., Yan Y., Ren Y., Zhou C., Yin G. Tire road friction coefficient estimation: review and research perspectives. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 2022. Vol. 35. Art. 6. DOI: 10.1186/s10033-021-00675-z.

*Стаття надійшла до редакції: 08.04.2026; рецензування: 15.04.2026;*

*прийнята до публікації 21.04.2026. Автори прочитали і дали згоду рукопису.*

*The article was submitted on 08.04.2026; revised on 15.04.2026; and accepted for publication on 21.04.2026. The authors read and approved the final version of the manuscript.*