

НЕСТЕРЕНКО ОЛЕКСАНДР ГРИГОРОВИЧ ✉ – аспірант кафедри автоматизованих електромеханічних систем, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»; м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0009-0005-0226-1153>; e-mail: Oleksandr.Nesterenko@ieec.khpi.edu.ua.

КУНЧЕНКО ТЕТЯНА ЮРІЙВНА – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри автоматизованих електромеханічних систем, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»; м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0009-0002-2462-1509>; e-mail: Tetiana.Kunchenko@khpi.edu.ua.

СТРУКТУРА СИСТЕМИ ВІРТУАЛЬНО-ФІЗИЧНИХ ВИПРОБУВАНЬ ДВОКОНТУРНОГО ІНДИВІДУАЛЬНОГО РЕГУЛЬОВАНОГО ЕЛЕКТРОПРИВОДУ ЕЛЕКТРОМОБІЛЯ

У статті розглянуто структуру системи віртуально-фізичних випробувань двоконтурного індивідуального регульованого електроприводу електромобіля та описано склад універсального випробувального стенда, призначеного для дослідження електромеханічних процесів у режимах, наближених до реальної експлуатації. Актуальність роботи зумовлена тим, що чисто імітаційне моделювання не дозволяє повною мірою врахувати особливості реальних електромашин, силових перетворювачів, вимірювальних каналів, теплових режимів і затримок у контурах керування, тоді як натурні дорожні випробування є складними та обмеженими з погляду відтворюваності умов. Метою статті є опис архітектури системи віртуально-фізичних випробувань, складу її фізичної та віртуальної частин, силових вузлів, вимірювальних каналів та функціональних можливостей. Показано, що система будується на основі загальної математичної моделі електромобіля, яка узгоджує навантажувальні режими через взаємодію тягових електроприводів коліс і навантажувальних пристроїв. Фізична частина реалізована у вигляді двох паралельних силових контурів, кожен з яких містить електромашину об'єкта дослідження, вимірювальний вузол і навантажувальний пристрій, а віртуальна частина включає математичну модель електромобіля та модель водія. Наведено склад універсального випробувального стенда, до якого входять силові контури, буферний накопичувач енергії, система автоматичного керування, модуль збору даних і засоби контролю крутного моменту, частоти обертання, струмів, напруг, температур і параметрів охолодження. Практична цінність роботи полягає у формуванні віртуально-фізичної випробувальної платформи, придатної для дослідження, налагодження і подальшої перевірки керувальних стратегій двоконтурного індивідуального регульованого електроприводу.

Ключові слова: електромобіль; двоконтурний індивідуальний регульований електропривод; віртуально-фізичні випробування; випробувальний стенд; математична модель електромобіля; електромеханічні процеси; силові контури.

Вступ. Дослідження двоконтурного індивідуального регульованого електроприводу електромобіля потребує не лише імітаційного моделювання, а й перевірки роботи силових контурів у режимах, наближених до реальних умов експлуатації. За чисто віртуального підходу можна відтворити динаміку руху, взаємодію коліс із дорожнім покриттям і роботу алгоритмів керування, однак при цьому не враховуються повною мірою особливості реальних електромашин, інверторів, вимірювальних каналів, теплових режимів та апаратних затримок. Саме тому доцільним є використання системи віртуально-фізичних випробувань, у якій математична модель електромобіля та стендове обладнання працюють у спільному замкненому циклі [1, 2].

Підхід, заснований на поєднанні математичного моделювання з фізичною реалізацією сигової частини, дає змогу перейти від аналізу окремих алгоритмів до дослідження апаратно-програмної системи в цілому. Для двоконтурного індивідуального регульованого електроприводу це особливо важливо, оскільки кожен силовий контур повинен не лише реалізовувати заданий крутний момент, а й коректно взаємодіяти з навантаженням, яке імітує дорожні умови, опори руху та режими буксування [3–6]. У практичному відношенні це вимагає створення такої випробувальної платформи, в якій математична модель електромобіля, модель водія, система керування, силові контури та вимірювальні канали утворюють єдину дослідницьку структуру [7–9].

У наявних дослідженнях значну увагу приділено алгоритмам керування індивідуальним електроприводом, математичним моделям руху електромобіля та методикам оцінювання ефективності керувальних стратегій [7–14]. Водночас архітектура самої системи віртуально-фізичних випробувань, структура універсального випробувального стенда, силові вузли та вимірювальні канали доцільно розглядати як окремий предмет дослідження. Саме такий фокус покладено в основу цієї статті: її предметом є не методика порівняння алгоритмів і не результати експериментів, а платформа, що забезпечує перехід від чистої симуляції до програмно-апаратного дослідження двоконтурного індивідуального регульованого електроприводу.

Метою статті є опис структури системи віртуально-фізичних випробувань двоконтурного індивідуального регульованого електроприводу електромобіля та розкриття складу універсального випробувального стенда, його силових вузлів, вимірювальних каналів і функціональних можливостей у режимі програмно-апаратного моделювання НІЛ (hardware-in-the-loop).

Архітектура системи віртуально-фізичних випробувань. В основу системи покладено принцип, за яким узгодження навантажувальних режимів силових агрегатів здійснюється загальною математичною моделлю електромобіля через зв'язок тягових електроприводів коліс і навантажувальних пристроїв [1, 2, 7]. Принципова архітектура такої

© О. Г. Нестеренко, Т. Ю. Кунченко, 2026



Ця робота ліцензується відповідно до *Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License (CC BY-NC 4.0)*
Конфлікт інтересів: Автори заявили про відсутність конфлікту

системи включає фізичну та віртуальну частини, поєднані між собою через електронний блок керування, систему обміну сигналами та контури зворотного зв'язку [1, 2]. На рис. 1 наведено архітектуру системи віртуально-фізичних випробувань.

У фізичній частині системи розміщено два паралельні силові контури: імітаційний контур правого колеса та імітаційний контур лівого колеса. Кожен із них складається з послідовно з'єднаних електромашини об'єкта дослідження, вимірювального пристрою та навантажувального пристрою у вигляді асинхронної електромашини. Віртуальна частина являє собою математичну модель електромобіля та модель водія. Така побудова забезпечує не просто незалежне керування двома каналами, а відтворення роботи електроприводу в умовах, що формуються моделлю руху електромобіля [7–9].

Визначальну роль у роботі системи відіграє електронний блок керування, який обмінюється інформацією з інверторами компонентів силового приводу через шину CAN, передаючи їм керувальні сигнали та отримуючи сигнали зворотного зв'язку. Вимірювальні пристрої реєструють крутні моменти та частоти обертання в силових контурах. Сигнали крутних моментів із вимірювальних пристроїв надходять до силового приводу віртуального електромобіля та приводять його в рух. Синхронізація фізичної та віртуальної частин системи виконується за допомогою зворотних зв'язків, а математичні моделі передають інверторам розрахункові значення крутних моментів і частот обертання електромашин. За нормальних умов руху крутний момент

навантажувальних пристроїв залишається вищим за крутний момент електромашини об'єкта дослідження. Якщо крутний момент електромашини перевищує крутний момент навантажувального пристрою, у системі виникає процес буксування віртуального колеса [10–14].

Структура універсального випробувального стенда. Для реалізації описаної архітектури було створено навантажувальний стенд для випробування електромашин, здатний імітувати експлуатаційні режими роботи двоконтурного індивідуального регульованого електроприводу електромобіля. Цей стенд є складовою універсального випробувального стенда та використовується як стендовий аналог двоконтурного електроприводу [1, 2]. На рис. 2 наведено принципову схему стенда.

Структурно стенд включає два паралельні силові контури, буферний накопичувач енергії та систему автоматичного керування. Керування стендом здійснюється мікропроцесорним блоком керування VCU, який забезпечує реалізацію алгоритму роботи системи. Процес вимірювань і проведення випробувань автоматизовано, а результати зберігаються в модулі збору даних для подальшої обробки. Наявність двох незалежних силових контурів дозволяє імітувати режими руху, у яких правий і лівий канали працюють за різних умов навантаження [7–10]. Саме це є принциповим для дослідження двоконтурного індивідуального регульованого електроприводу.

Основні складові випробувального стенда наведено в табл. 1.

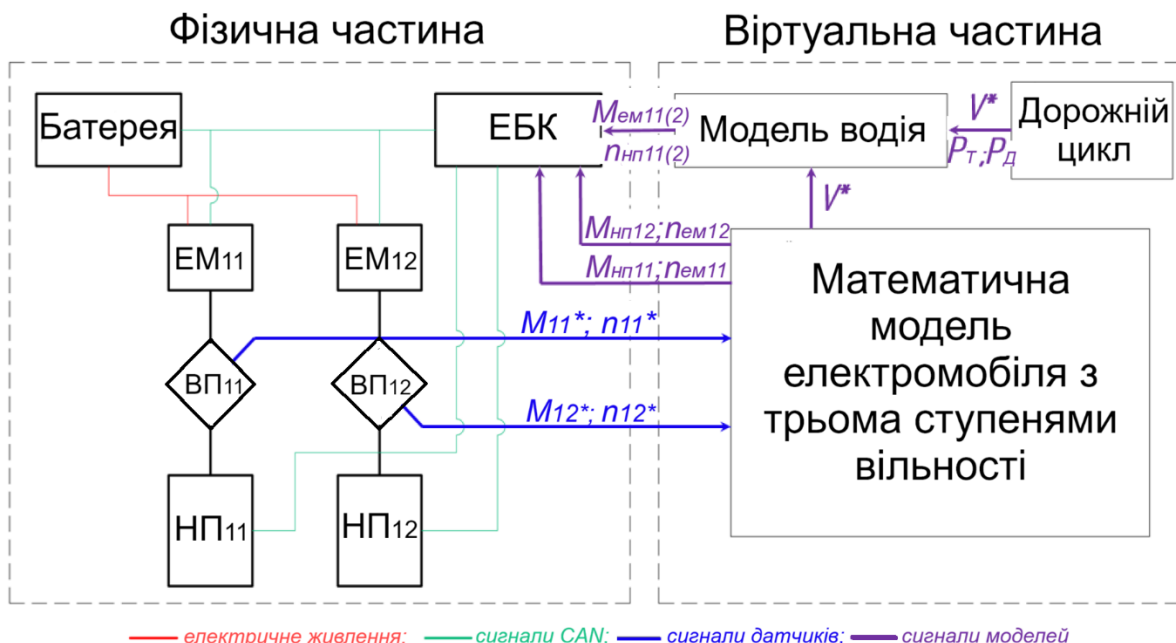


Рисунок 1 – Архітектура системи віртуально-фізичних випробувань:

НП – навантажувальний пристрій; ВП – вимірювальний пристрій; ЕМ – електромашини; ЕБК – електронний блок керування; $M_{ем}$ – керувальний сигнал крутного моменту електромашин об'єкта дослідження, Н·м; $n_{ем}$ – керувальний сигнал частоти обертання електромашин об'єкта дослідження, 1/с; $M_{нп}$ – керувальний сигнал крутного моменту навантажувальних пристроїв, Н·м; $n_{нп}$ – керувальний сигнал частоти обертання навантажувальних пристроїв, 1/с; P_T – тип покриття; P_d – довжина ділянки покриття

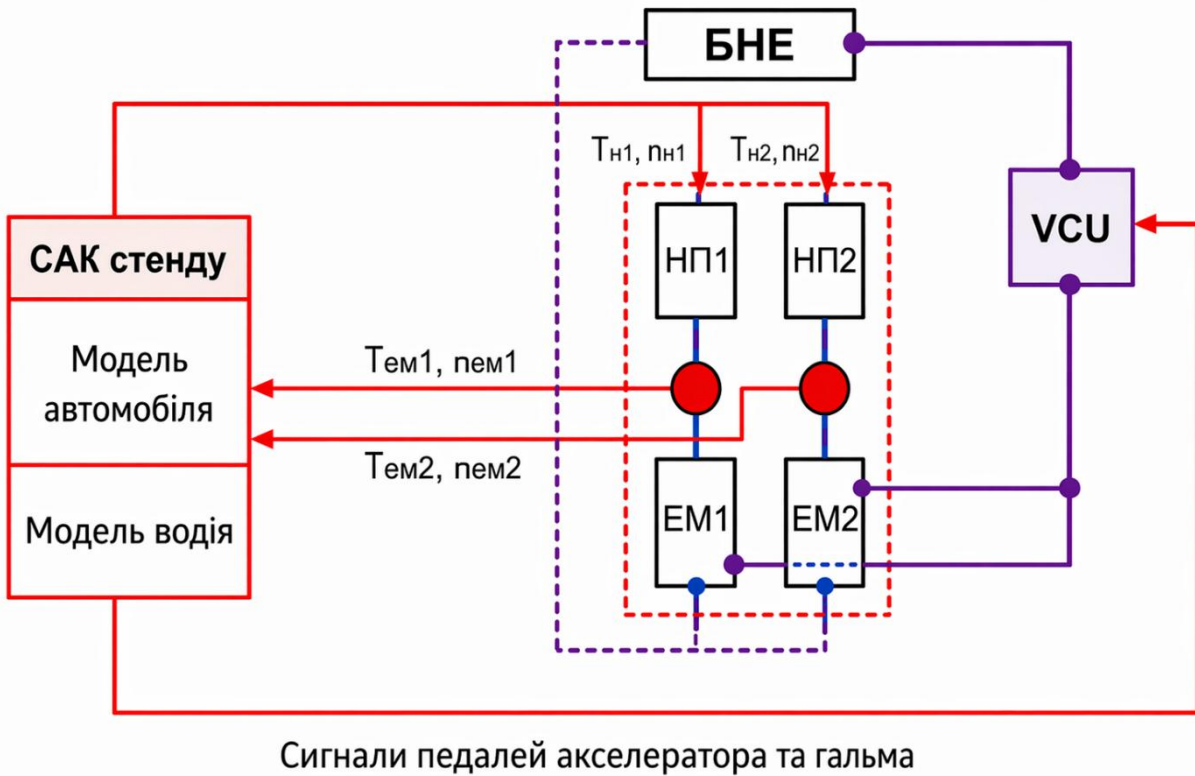


Рисунок 2 – Принципова схема навантажувального стенда для випробування електромашин: БНЕ – буферний накопичувач енергії; EM – електромашини; НП – навантажувальні пристрої; VCU – мікропроцесорний блок керування; САК – система автоматичного керування; T_{em1} і n_{em1} , T_{em2} і n_{em2} – крутні моменти та частоти обертання електромашин відповідно; T_{n1} і n_{n1} , T_{n2} і n_{n2} – крутні моменти та частоти обертання навантажувальних пристроїв відповідно

Таблиця 1 – Основні складові випробувального стенда

Складова стенда	Призначення
Два паралельні силові контури	Імітація роботи правого і лівого каналів двоконтурного індивідуального регульованого електроприводу
Електромашини об'єкта дослідження YASA-400	Відтворення тягових електромашин індивідуального регульованого електроприводу
Навантажувальні пристрої Siemens 1PV5138-4WS24	Імітація дорожнього навантаження та дії робочої гальмівної системи
Буферний накопичувач енергії на базі WB-LYP60AHА	Накопичення, заряд-розряд і перерозподіл енергії між електричними пристроями стенда
Інвертори Sevcon	Керування навантажувальними електромашинами
Інвертори RMS PM150	Керування електромашинами YASA-400
Мікропроцесорний блок керування VCU	Реалізація алгоритму системи автоматичного керування стенда
Модуль збору даних	Збереження результатів вимірювань і випробувань для подальшої обробки

Додатково до принципової схеми доцільно використати рисунок, який відображає модель і блок-схему стенда для випробування електромашин. На рис. 3 наведено модель і блок-схему стенда для випробування електромашин.

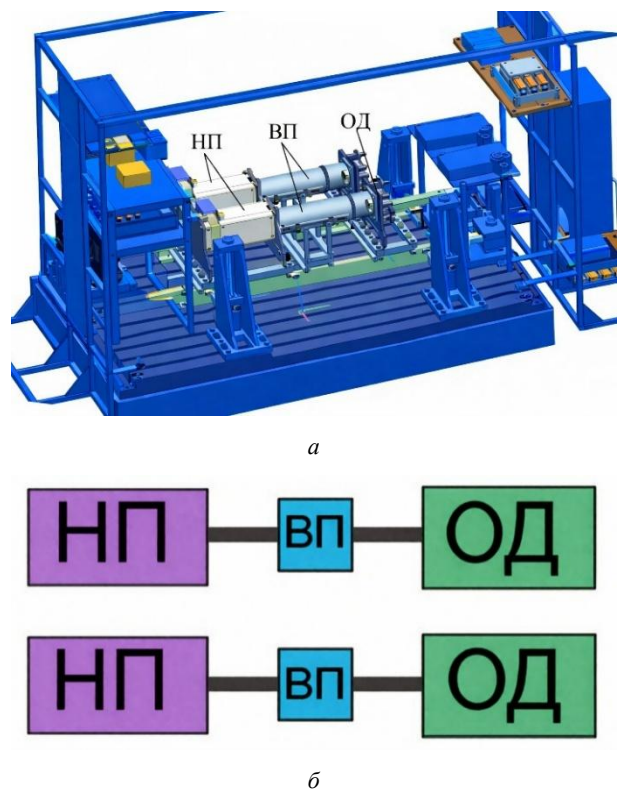


Рисунок 3 – Модель (а) і блок-схема (б) стенда для випробування електромашин: НП – навантажувальні пристрої; ВП – вимірювальні пристрої; ОД – об'єкти дослідження

Силові вузли та вимірювальні канали. Кожен силовий контур стенда побудовано як послідовність «електромашинна об'єкта дослідження – вимірювальний вузол – навантажувальний пристрій». Вимірювання крутного моменту в контурах здійснюється тензометричними муфтами, встановленими між електромашинами об'єкта дослідження та навантажувальними пристроями. Такий підхід забезпечує безпосередню реєстрацію механічної взаємодії в контурі та створює основу для синхронізації фізичної та віртуальної частин системи [1, 2].

Кожен силовий контур стенда відтворює електромеханічний ланцюг перетворення та передачі енергії, у якому електрична енергія, що надходить через силовий перетворювач до електромашини, перетворюється на механічний момент і далі реалізується у взаємодії з навантажувальним пристроєм та вимірювальним вузлом [7, 8].

Навантажувальні пристрої являють собою трифазні асинхронні тягові електромашини Siemens 1PV5138-4WS24, які дозволяють імітувати навантаження на ведучі колеса з боку дороги та дію робочої гальмівної системи [10, 13, 14]. Їх живлення здійснюється через інвертори Sevcon, підключені до зовнішньої електричної мережі з можливістю відведення енергії на зовнішнє резисторне навантаження. Пристрої керування інверторами включені в шину CAN. Програмне забезпечення навантажувальних електромашин забезпечує керування як за крутним моментом, так і за частотою обертання, тоді як електромашини YASA-400 керуються за крутним моментом. Двоконтурна система керування дозволяє задавати навантаження або у вигляді сталого крутного моменту, або у вигляді сталої частоти обертання навантажувальних електромашин. За рахунок цього створюються необхідні дорожні умови та реєструються необхідні сигнали вимірювальною апаратурою.

Живлення електромашин YASA-400 здійснюється за допомогою інверторів RMS PM150, підключених до енергетичного модуля, а керування ними виконується через шину CAN інверторів. У склад стенда входить енергетичний модуль ємністю 60 А·год, виконаний на базі блоків акумуляторних батарей WB-LYP60AH. Така конфігурація забезпечує накопичення, заряд-розряд і перерозподіл енергії між електричними пристроями стенда.

У кожному контурі стенда встановлено датчики температури та витрати охолоджувальної рідини. Система контролю температур охоплює температуру охолоджувальної рідини на вході та виході електромашин YASA-400 у двох потоках потужності, температури в контурах охолодження навантажувальних електромашин Siemens 1PV5138-4WS24, а також температуру ротора. Крім того, в системі використано датчики постійного і змінного струму та напруги, зокрема датчики сили струму LTC 1000-SF/SP2 та датчики напруги CV 3-2000. Це забезпечує одночасний контроль механічних,

електричних і теплових параметрів силових контурів [1, 2].

Основні реєстровані сигнали та засоби їх вимірювання наведено в табл. 2.

Таблиця 2 – Основні реєстровані сигнали та засоби їх вимірювання

Реєстрований параметр	Засіб вимірювання / джерело сигналу	Призначення
Крутний момент у силових контурах	Тензометричні муфти	Контроль механічного навантаження та синхронізація фізичної і віртуальної частин системи
Частота обертання електромашин і навантажувальних пристроїв	Вимірювальні канали контурів / сигнали інверторів	Визначення режиму роботи силових контурів
Струм у силових колах	Датчики струму LTC 1000-SF/SP2	Контроль електричного навантаження
Напруга в силових колах	Датчики напруги CV 3-2000	Контроль режимів живлення та енергетичного обміну
Температура охолоджувальної рідини на вході та виході електромашин	Температурні датчики	Контроль теплового стану електромашин
Температура в контурах охолодження навантажувальних пристроїв	Температурні датчики	Контроль теплового режиму навантажувальних машин
Температура ротора	Температурні датчики	Контроль допустимого теплового навантаження
Витрата охолоджувальної рідини	Датчики витрати	Контроль роботи системи охолодження

Наведений склад вимірювальних каналів забезпечує реєстрацію основних механічних, електричних і теплових параметрів стенда, необхідних для проведення віртуально-фізичних випробувань і подальшого аналізу режимів роботи двоконтурного індивідуального регульованого електроприводу.

Функціональні можливості системи.

Варіативність систем керування навантажувальними і випробуваними електромашинами дозволяє досягти максимально наближеного до реальності режиму руху віртуального електромобіля з електричною трансмісією та індивідуальним регулюванням потоків потужності. Навантажувальні пристрої можуть працювати спільно або незалежно один від одного, що дає змогу враховувати найрізноманітніші режими руху електромобіля: рух зі змінною швидкістю, рух у дорожньому циклі, рух по дорогах із різними покриттями, рух із ковзанням і буксуванням коліс, а також рух по криволінійних траєкторіях [3–6, 10–14].

Важливою властивістю стенда є реалізація технології програмно-апаратного моделювання HiL [1, 2]. Такий підхід ґрунтується на заміні об'єкта керування та навколишнього середовища математичною моделлю й забезпечує проведення віртуально-фізичних випробувань у режимі реального часу. У межах цієї системи математична модель не лише формує випробувальний сценарій, а й безпосередньо бере участь у відтворенні взаємодії між електромашинами, навантажувальними пристроями, дорожніми умовами та контурами керування [1, 2, 10–14].

Таким чином, система віртуально-фізичних випробувань виконує подвійну функцію. З одного боку, вона є стендовою базою для випробування силових вузлів двоконтурного індивідуального регульованого електроприводу. З іншого боку, вона є засобом переходу від чистого імітаційного моделювання до дослідження електромеханічних процесів у віртуально-фізичному середовищі, де навантаження, швидкості, моменти та дорожні умови формуються математичною моделлю, а реалізуються фізичним стендом.

Висновки. Розроблено структуру системи віртуально-фізичних випробувань двоконтурного індивідуального регульованого електроприводу, у якій узгодження навантажувальних режимів здійснюється загальною математичною моделлю електромобіля через взаємодію тягових електроприводів коліс і навантажувальних пристроїв.

Показано, що фізична частина системи доцільно реалізується у вигляді двох паралельних силових контурів, а віртуальна частина має включати математичну модель електромобіля та модель водія. Визначальну роль у роботі системи відіграє електронний блок керування, який забезпечує обмін сигналами з компонентами силового приводу через шину CAN і синхронізацію фізичної та віртуальної частин за зворотними зв'язками з вимірювальних пристроїв.

Встановлено, що універсальний випробувальний стенд має включати два паралельні силові контури, буферний накопичувач енергії, систему автоматичного керування, модуль збору даних, а також вимірювальні канали для контролю крутного моменту, частоти обертання, струмів, напруг і теплових параметрів. Це забезпечує відтворення широкого спектра режимів руху та навантаження двоконтурного індивідуального регульованого електроприводу.

Показано, що система віртуально-фізичних випробувань забезпечує поєднання математичної моделі електромобіля з фізичною стендовою базою в єдиному контурі дослідження, що робить її придатною для подальшої перевірки та порівняння алгоритмів керування двоконтурним індивідуальним регульованим електроприводом у режимі програмно-апаратного моделювання HiL.

Список літератури

1. Lin C., Zhang L. Hardware-in-the-loop simulation and its application in electric vehicle development. *2008 IEEE Vehicle Power and*

- Propulsion Conference (VPPC)*, Harbin, Hei Longjiang, China, 3–5 September 2008. DOI: <https://doi.org/10.1109/vppc.2008.4677560>.
2. 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 / A. Kasri et al. *Results in Engineering*. 2024. Vol. 22. 102223. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2024.102223>.
3. Pacejka H. B. *Tire and vehicle dynamics*. 3rd ed. Kidlington, Oxford, UK: Elsevier, Butterworth-Heinemann, 2012. 672 p. DOI: <https://doi.org/10.1016/c2010-0-68548-8>.
4. Gillespie T. D. *Fundamentals of vehicle dynamics*. 2nd revised ed. Warrendale, PA, USA: SAE International, 2021. 512 p. DOI: <https://doi.org/10.4271/9781468601770>.
5. Rajamani R. *Vehicle dynamics and control*. 2nd ed. New York, NY, USA: Springer US, 2012. 498 p. DOI: <https://doi.org/10.1007/978-1-4614-1433-9>.
6. Wong J. Y. *Theory of ground vehicles*. 5th ed. Hoboken, NJ, USA: Wiley & Sons, Incorporated, John, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1002/9781119719984>.
7. Zhang X. *Modeling and dynamics control for distributed drive electric vehicles*. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2021. 208 p. DOI: <https://doi.org/10.1007/978-3-658-32213-7>.
8. 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: <https://doi.org/10.1080/00423114.2021.1916048>.
9. Integrated chassis control: classification, analysis and future trends / V. Mazzilli et al. *Annual Reviews in Control*. 2021. Vol. 51. P. 172–205. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.arcontrol.2021.01.005>.
10. Fujimoto H., Amada J., Maeda K. Review of traction and braking control for electric vehicle. *2012 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference (VPPC)*, Seoul, Korea (South), 9–12 October 2012. 2012. P. 1292–1299. DOI: <https://doi.org/10.1109/vppc.2012.6422491>.
11. Tire road friction coefficient estimation: review and research perspectives / Y. Wang et al. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*. 2022. Vol. 35. 6. DOI: <https://doi.org/10.1186/s10033-021-00675-z>.
12. Heidfeld H., Schünemann M., Kasper R. UKF-based State and tire slip estimation for a 4WD electric vehicle. *Vehicle System Dynamics*. 2019. Vol. 58, no. 10. P. 1479–1496. DOI: <https://doi.org/10.1080/00423114.2019.1648836>.
13. Acceleration-based wheel slip control realized with decentralised electric drivetrain systems / B. Jiang et al. *IET Electrical Systems in Transportation*. 2022. Vol. 12, no. 2. P. 143–152. DOI: <https://doi.org/10.1049/els2.12044>.
14. Vošahlik D., Hanis T. Real-time estimation of the optimal longitudinal slip ratio for attaining the maximum traction force. *Control Engineering Practice*. 2024. Vol. 145. 105876. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conengprac.2024.105876>.

References

1. C. Lin and L. Zhang, "Hardware-in-the-loop simulation and its application in electric vehicle development," in *2008 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference (VPPC)*, Harbin, Hei Longjiang, China, Sep. 3–5, 2008. IEEE, 2008, doi: <https://doi.org/10.1109/vppc.2008.4677560>
2. A. Kasri, K. Ouari, Y. Belkhir, A. Oubelaid, M. Bajaj, and M. Berhanu, "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*, vol. 22, May 2024, Art. no. 102223, doi: <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2024.102223>
3. H. B. Pacejka, *Tire and Vehicle Dynamics*, 3rd ed. Kidlington, Oxford, UK: Elsevier, Butterworth-Heinemann, 2012, doi: <https://doi.org/10.1016/c2010-0-68548-8>
4. T. D. Gillespie, *Fundamentals of Vehicle Dynamics*, 2nd ed. Warrendale, PA, USA: SAE Int., 2021, doi: <https://doi.org/10.4271/9781468601770>
5. R. Rajamani, *Vehicle Dynamics and Control*, 2nd ed. New York, NY, USA: Springer US, 2012, doi: <https://doi.org/10.1007/978-1-4614-1433-9>

6. J. Y. Wong, *Theory of Ground Vehicles*, 5th ed. Hoboken, NJ, USA: Wiley & Sons, Inc., John, 2022, doi: <https://doi.org/10.1002/9781119719984>
7. X. Zhang, *Modeling and Dynamics Control for Distributed Drive Electric Vehicles*. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesb., 2021, doi: <https://doi.org/10.1007/978-3-658-32213-7>
8. E. Katsuyama, M. Yamakado, and M. Abe, "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*, vol. 59, no. 7, pp. 976–1025, Jun. 2021, doi: <https://doi.org/10.1080/00423114.2021.1916048>
9. V. Mazzilli *et al.*, "Integrated chassis control: Classification, analysis and future trends," *Annual Reviews in Control*, vol. 51, pp. 172–205, 2021, doi: <https://doi.org/10.1016/j.arcontrol.2021.01.005>
10. H. Fujimoto, J. Amada, and K. Maeda, "Review of traction and braking control for electric vehicle," in *2012 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference (VPPC)*, Seoul, Korea (South), Oct. 9–12, 2012. IEEE, 2012, pp. 1292–1299, doi: <https://doi.org/10.1109/vppc.2012.6422491>
11. Y. Wang *et al.*, "Tire road friction coefficient estimation: Review and research perspectives," *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, vol. 35, Jan. 2022, Art. no. 6, doi: <https://doi.org/10.1186/s10033-021-00675-z>
12. H. Heidfeld, M. Schünemann, and R. Kasper, "UKF-based State and tire slip estimation for a 4WD electric vehicle," *Vehicle System Dynamics*, vol. 58, no. 10, pp. 1479–1496, Aug. 2019, doi: <https://doi.org/10.1080/00423114.2019.1648836>
13. B. Jiang, N. Sharma, Y. Liu, and C. Li, "Acceleration-based wheel slip control realized with decentralised electric drivetrain systems," *IET Electrical Systems in Transportation*, vol. 12, no. 2, pp. 143–152, May 2022, doi: <https://doi.org/10.1049/els2.12044>
14. D. Vošahlík and T. Hanis, "Real-time estimation of the optimal longitudinal slip ratio for attaining the maximum traction force," *Control Engineering Practice*, vol. 145, Apr. 2024, Art. no. 105876, doi: <https://doi.org/10.1016/j.conengprac.2024.105876>

Надійшла (Received) 25.04.2026

Прийнята (Accepted) 05.05.2026

Опублікована (Published) 29.05.2026

UDC 621.311

OLEKSANDR NESTERENKO ✉ – Postgraduate Student of the Department of Automated Electromechanical Systems, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute"; Kharkiv, Ukraine; ORCID: <https://orcid.org/0009-0005-0226-1153>; e-mail: Oleksandr.Nesterenko@ieeee.khpi.edu.ua.

OLEKSANDR NESTERENKO – Candidate of Technical Sciences (PhD), Docent, Associate Professor of the Department of Automated Electromechanical Systems, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute"; Kharkiv, Ukraine; ORCID: <https://orcid.org/0009-0002-2462-1509>; e-mail: Tetiana.Kunchenko@khpi.edu.ua.

STRUCTURE OF A VIRTUAL-PHYSICAL TESTING SYSTEM FOR A DUAL-CHANNEL INDIVIDUAL CONTROLLED ELECTRIC DRIVE OF AN ELECTRIC VEHICLE

The paper considers the structure of a virtual-physical testing system for a dual-channel individual controlled electric drive of an electric vehicle and describes the composition of a universal test bench intended for the study of electromechanical processes under conditions close to real operation. The relevance of the study is determined by the fact that purely simulation-based modelling cannot fully account for the behaviour of real electric machines, power converters, measurement channels, thermal conditions, and delays in control loops, whereas full-scale road tests are complex and limited in terms of reproducibility of operating conditions. The purpose of the paper is to describe the architecture of the virtual-physical testing system, the composition of its physical and virtual parts, the power units, measurement channels, and functional capabilities. It is shown that the system is based on a general mathematical model of the electric vehicle, which coordinates loading modes through the interaction of wheel traction electric drives and loading devices. The physical part is implemented as two parallel power channels, each including the electric machine under study, a measuring unit, and a loading device, while the virtual part includes the mathematical model of the electric vehicle and the driver model. The paper presents the composition of the universal test bench, including power channels, a buffer energy storage unit, an automatic control system, a data acquisition module, and means for monitoring torque, rotational speed, current, voltage, temperature, and cooling parameters. The practical value of the work lies in the development of a virtual-physical testing platform suitable for the study, adjustment, and further verification of control strategies for a dual-channel individual controlled electric drive.

Keywords: electric vehicle; dual-channel individual controlled electric drive; virtual-physical testing; test bench; electric vehicle mathematical model; electromechanical processes; power channels.