

Нове покоління високоефективних електромеханічних систем електричних транспортних засобів з векторно-керованими двигунами, які не містять рідкоземельних матеріалів.

Next Generation of the Highly Efficient Traction Electromechanical Systems With Permanent Magnets Free Motors

1. **Номер державної реєстрації** 0122U001700.
2. **Науковий керівник** д.т.н., проф. Пересада С. М., Dr. Sci, (Tech), Prof. Peresada Sergei.
3. **Суть розробки, основні результати.**

Набула розвитку теорія і практика високоефективних електромеханічних систем з тяговим електроприводом на базі асинхронних і синхронних реактивних двигунів, які не використовують рідкоземельні постійні магніти, що дозволяє подолати проблему їх обмеженої доступності.

Розроблено та впроваджено нові методи нелінійного та адаптивного керування електромеханічними системами та процесами енергообміну між тяговим електроприводом і гібридними джерелами живлення на основі акумуляторних батарей і суперконденсаторів. Обґрунтовано альтернативні до існуючих математичні моделі асинхронних і синхронних реактивних двигунів, на основі яких розвинуто теорію синтезу та аналізу систем векторного керування класом глибоко насичених електричних машин. Розроблено новий метод керування моментом (кутовою швидкістю) і вектором потокозчеплення, який забезпечує асимптотичне відпрацювання заданих траєкторій моменту (кутової швидкості) і вектора потокозчеплення, а також динамічну розв'язку процесів керування цими змінними з підвищеними властивостями робастності. Нова структура системи керування, яку сформовано на основі синтезу, дозволяє аналітично-чисельним методом формалізувати оптимізацію за критерієм «момент-струм» МРТА, не впливаючи при цьому на динамічну поведінку механічних координат. Розвинуто теорію адаптивного керування класом нелінійних об'єктів шляхом розробки нових методів адаптивного оцінювання невимірюваних координат, а також ідентифікації параметрів і нелінійних характеристик математичних моделей електродвигунів змінного струму. Вперше з позицій теорії адаптивного керування теоретично обґрунтовано можливість оцінювання змінних у часі параметрів за рахунок формування «сильних» умов персистентності збудження. Розроблено новий метод синтезу і аналізу двоконтурних систем керування класом DC-DC перетворювачів, на основі якого розроблено новий метод швидкодіючого керування потоками енергії між тяговим електроприводом і гібридними джерелами живлення з адаптивним обмеженням похідної від струму батареї.

На основі технології швидкого прототипного тестування спроектовано і виготовлено лабораторний комплекс для проведення широкого спектру експериментальних досліджень систем векторного керування прототипів тягових електромеханічних систем різної конфігурації. Результати повномасштабних досліджень розроблених систем векторного керування тяговими електроприводами та комбінованими джерелами живлення підтверджують їх високі динамічні властивості і підвищену енергоефективність.

A novel theoretical and practical development for highly efficient traction electromechanical systems based on the induction and synchronous reluctance motors is presented, which allows to overcome the problem of permanent magnets limited availability. New nonlinear and adaptive control methods have been developed for traction electrical drives and hybrid energy storage systems based on batteries and ultra capacitors. The theory of vector control systems design was extended to class of highly saturated electric motors using their improved mathematical models. A novel control guarantees the asymptotic torque (speed)-flux tracking together with dynamic decoupling of the controlled variables and improved robustness

properties. It is proved that MPTA optimized control strategy can easily applied in designed system structure. The theory of adaptive control is extended for class of nonlinear plants with the time varying parameters by introducing the conditions of “strong persistency of excitation” together with high gain identification. A new design and analysis of the cascaded DC-DC converter system is proposed in order to construct the two-time scale separation of the battery and ultra capacitor currents with adaptive current derivative limitation.

Using the technology of the rapid prototyping the laboratory complex of setups has been designed and implemented for experimental testing of the wide spectrum of the tracking electromechanical systems. The results of the full-scale experimental tests show the effectiveness of the solutions proposed.

4. **Наявність охоронних документів** на об’єкти права інтелектуальної власності (*заявка на патент, патент, свідоцтво на авторське право*).

4.1 Номер заявки u 2023 03698. Автори: Пересада С.М., Ковбаса С.М., Стаценко О.В. Пристрій для тестування електромеханічних систем електричних транспортних засобів

4.2 Номер заявки s202305882 Автори Пересада С.М., Ковбаса С.М., Волянський Р.С., Визначення стійкості систем векторного керування напругою асинхронного генератора

5. **Порівняння зі світовими аналогами.** Розроблені алгоритми векторного керування та ідентифікації параметрів синхронних реактивних та асинхронних двигунів, а також електромеханічні системи на їх основі відповідають світовому рівню, що зокрема підтверджується наявністю публікацій авторів у високорейтингових світових журналах.

6. **Економічна привабливість для просування на ринок** (*вартість реалізації проекту, терміни впровадження та окупності, показники*).

Можливість виробництва тягових електроприводів в Україні та імпортозаміщення при створенні нових і модернізації існуючих моделей електротранспорту.

Потреби ринку України в тяговому електроприводі оцінюються на рівні 6000 од (станом на 2021 рік).

За даними українських виробників:

- вартість закордонного комплексу складає 70 – 90 тис. євро.

- вартість комплексу вітчизняного виробництва є на 40 – 45% меншою.

2. Підвищення ККД тягового електроприводу на 6% для 6000 транспортних засобів дозволить досягти економії електроенергії на рівні 200 млн. грн. на рік (при середньому споживанні 2.5 кВт/км та щоденному пробігу на рівні 300 км).

7. **Потенційні користувачі** (*галузі, міністерства, відомства, підприємства, організації*).

ПрАТ «Запорізький електроапаратний завод», м. Запоріжжя.

Корпорація «Богдан», м. Київ.

ТОВ «АВМ АМПЕР», м. Кременчук.

ТОВ Політехносервіс, м. Бровари.

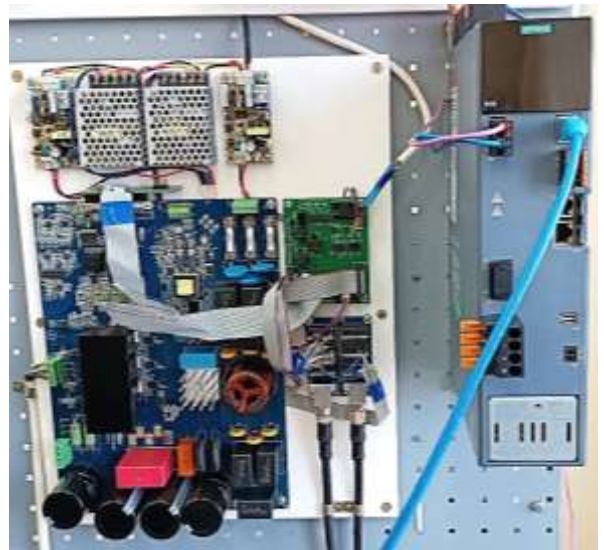
8. **Стан готовності розробки** (*лабораторний або промисловий зразок, технічна документація, бізнес-план, готова до впровадження тощо із зазначенням технологічного рівня готовності (TRL)*).

TRL 4 — Технологія, перевірена в лабораторії, наявний лабораторний прототип

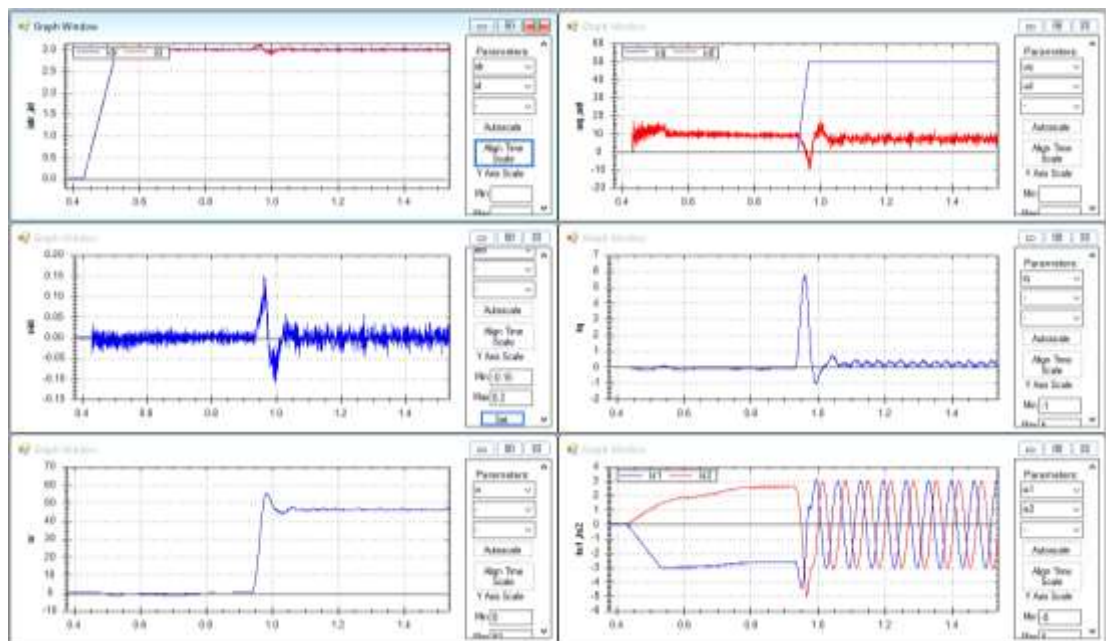
9. Існуючі результати впровадження. Рекомендації щодо побудови підсистеми діагностики електромеханічної системи тролейбуса PTS-12. Рекомендації щодо автоматизації електромеханічної системи тролейбуса PTS-12.

10. **Назва підрозділу, телефон, e-mail.** КПІ ім. Ігоря Сікорського, факультет електроенерготехніки та автоматики, кафедра автоматизації електромеханічних систем та електроприводу, 044-204-83-56, sergei.peresada@gmail.com.

11. Фото (обов'язково) або кілька слайдів презентації з фото розробки в електронному вигляді (рекламного характеру). Якщо фото надається окремим файлом, бажано використовувати JPEG формат.



Лабораторний стенд з силовим перетворювачем з транзисторами на основі силікон-карбїду



Програмне забезпечення для візуалізації динамічних процесів



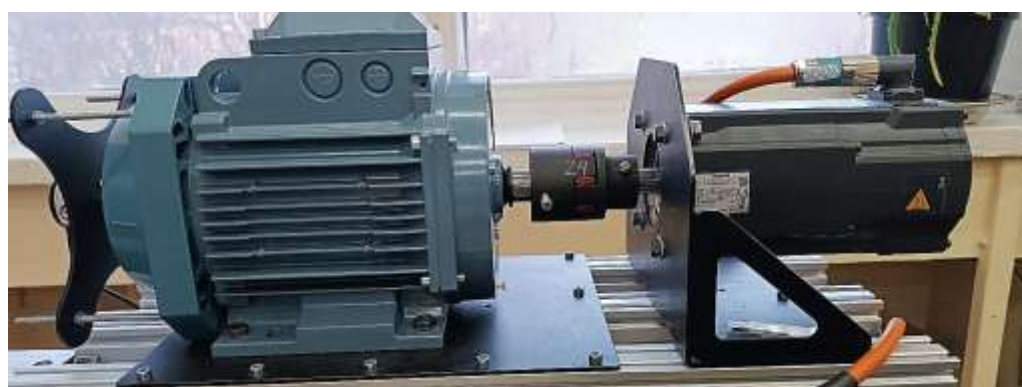
Кеурючий контролер SpeedGoat



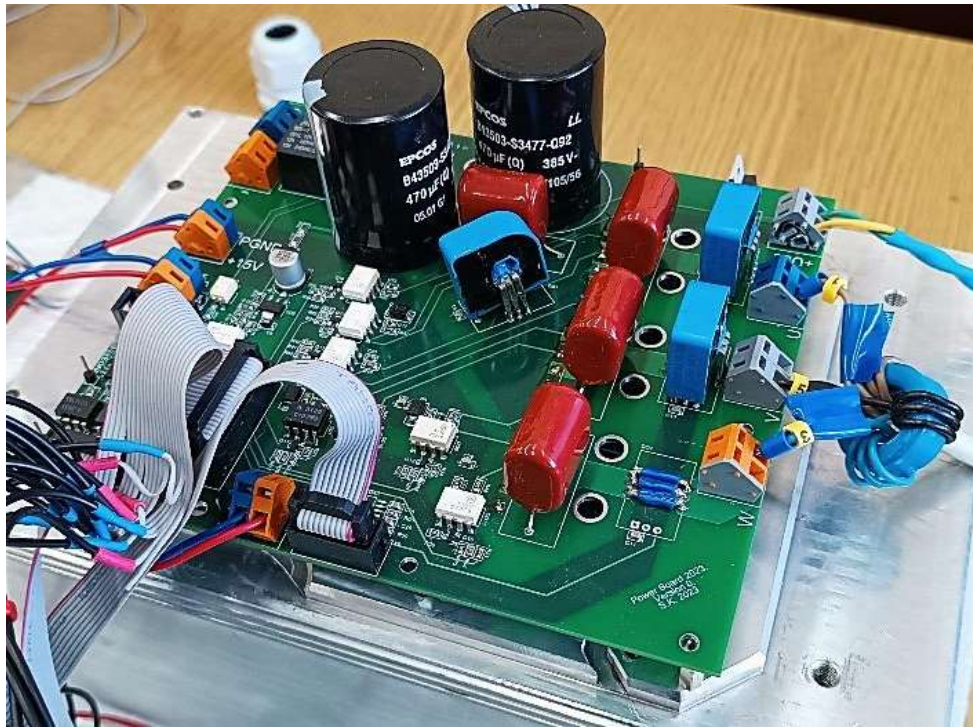
Синхронний двигун з постійними магнітами (СДПМ) низької напруги



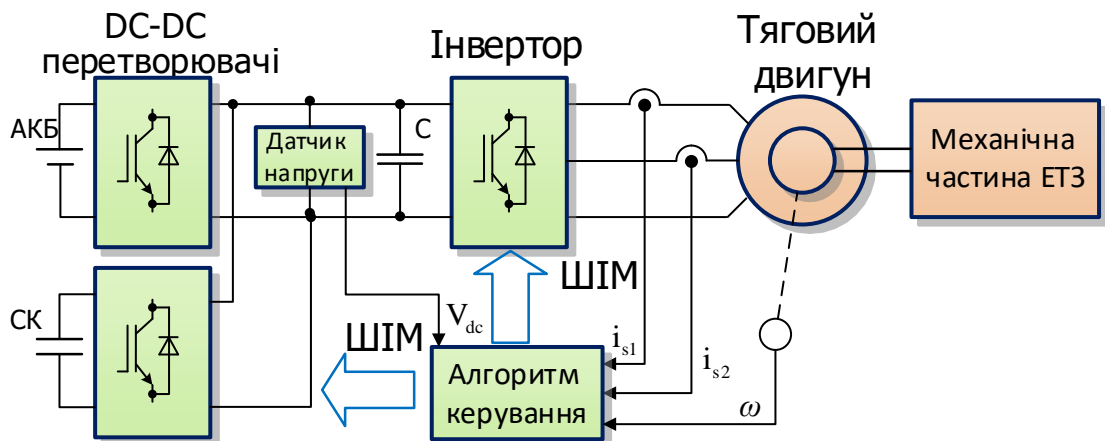
Пара «СДПМ – асинхронний двигун»



Пара «синхронний реактивний двигун – СДПМ»



Силова частина лабораторного дослідного зразка електроприводу на основі керуючих контролерів TMS320F28335



Система керування тяговою електромеханічною системою з гібридним джерелом живлення

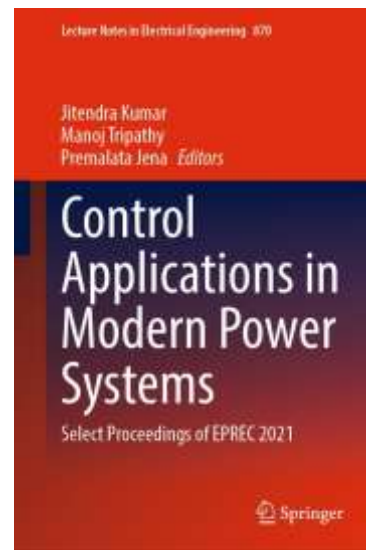
12. Перелік публікацій за матеріалами досліджень за період виконання (*вагомі: монографії, підручники, посібники, наукові статті, дисертації, інші публікації*).

Монографії та навчальні посібники

1. *Векторне керування асинхронними двигунами з максимізацією співвідношення момент-струм статора. Монографія* / Пересада С. М., Ковбаса С. М., Ніконенко Є. О., Димко С. С. –Київ, КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2023, –139 с. ISBN 978-617-8268-05-3.

2. *Цифрове керування електромеханічними системами [Електронний ресурс]: підручник для студентів спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка» за освітньою програмою «Електромеханічні системи автоматизації, електропривод та електромобільність»* / С.В. Божко, С.М. Пересада, М.В. Печеник, О.І. Толочко; КПІ ім. Ігоря Сікорського. – Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2021. – 149 с. URL: <https://ela.kpi.ua/handle/123456789/51247>.

3. Voliansky, R. et al. (2022). Lyapunov function in the hyper-complex phase space. In: Kumar, J., Tripathy, M., Jena, P. (eds.) *Control Applications in Modern Power Systems. Lecture Notes in Electrical Engineering*, vol. 870. Springer, Singapore, pp 537–553 https://doi.org/10.1007/978-981-19-0193-5_42.



Статті у періодичних виданнях

1. V. Varvolik, G. Buticchi, S. Wang, D. Prystupa, S. Peresada, S. Bozhko, and M. Galea, “High-fidelity model identification for synchronous reluctance motor drives,” *IEEE Transactions on Energy Conversion*, pp. 1-11, 2023. <https://doi.org/10.1109/TEC.2023.3277478>.
 2. V. Varvolik G. Buticchi, D. Prystupa, S. Wang, A. Aboelhassan, S. Peresada, M. Galea, “Comparative Study on Torque Ripple Reduction Considering Minimum Losses for Synchronous Reluctance Motor Drives,” in *IEEE Transactions on Transportation Electrification*, 2023 <https://doi.org/10.1109/TTE.2023.3337771>.
 3. Varvolik, V.; Wang, S.; Prystupa, D.; Buticchi, G.; Peresada, S.; Galea, M.; Bozhko, S. Fast Experimental Magnetic Model Identification for Synchronous Reluctance Motor Drives. *Energies*, 2022, 15, p. 2207. <https://doi.org/10.3390/en15062207>.
 4. S. Peresada, Y. Nikonenko, S. Kovbasa, D. Rodkin and O. Kiselychnyk, “Observer-based speed estimation for vector controlled induction motors”, *Technical Electrodynamics*, 2022, vol. 1, pp. 25-32. <https://doi.org/10.15407/techned2022.05.045>.
 5. С.М. Пересада, Є.О. Ніконенко, С.М. Ковбаса, О. Кузнецов, «Спостерігач потокозчеплення, адаптивний до змін активного опору ротора асинхронних двигунів», *Технічна електродинаміка*, 2022, № 5 (вересень/жовтень), с. 45-51, <https://doi.org/10.15407/techned2022.05.045>.
 6. S. Peresada, D. Rodkin, Y. Nikonenko, S. Kovbasa, V. Polischuk, «Robust control of low-cost direct drives based on interior permanent magnet synchronous motors», *Technical Electrodynamics*, 2023, №. 2, pp. 37-44. DOI: <http://dx.doi.org/10.15407/techned2023.02.037>.
 7. С.М. Пересада, Є.О. Ніконенко, С.М. Ковбаса, О. Кузнецов, «Адаптивні спостерігачі частоти двофазних та однофазних гармонічних сигналів», *Технічна електродинаміка*, 2023, № 1, с. 25-33. DOI: <http://dx.doi.org/10.15407/techned2023.01.025>.
13. **Ключові слова:** синхронний реактивний двигун, асинхронний двигун, векторне керування, тяговий електропривод, ідентифікація параметрів, гібридне джерело живлення, силовий DC-DC перетворювач.