



# Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Завершена прикладна науково-дослідна робота

## «Нове покоління вискоелективних електромеханічних систем електричних транспортних засобів з векторно-керованими двигунами, які не містять рідкоземельних матеріалів»

Науковий керівник: д.т.н., проф. Пересада Сергій Михайлович  
код реєстрації НДР в університеті: 2508п

**Період виконання**  
01.01.2022 – 31.12.2023

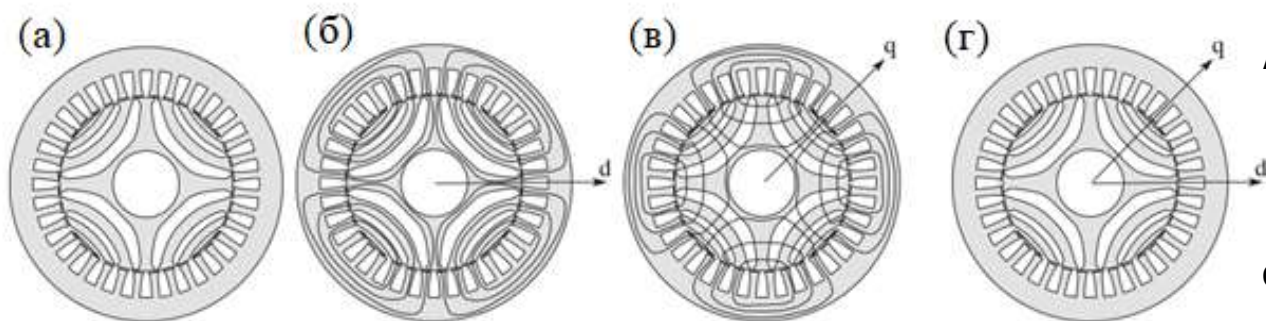




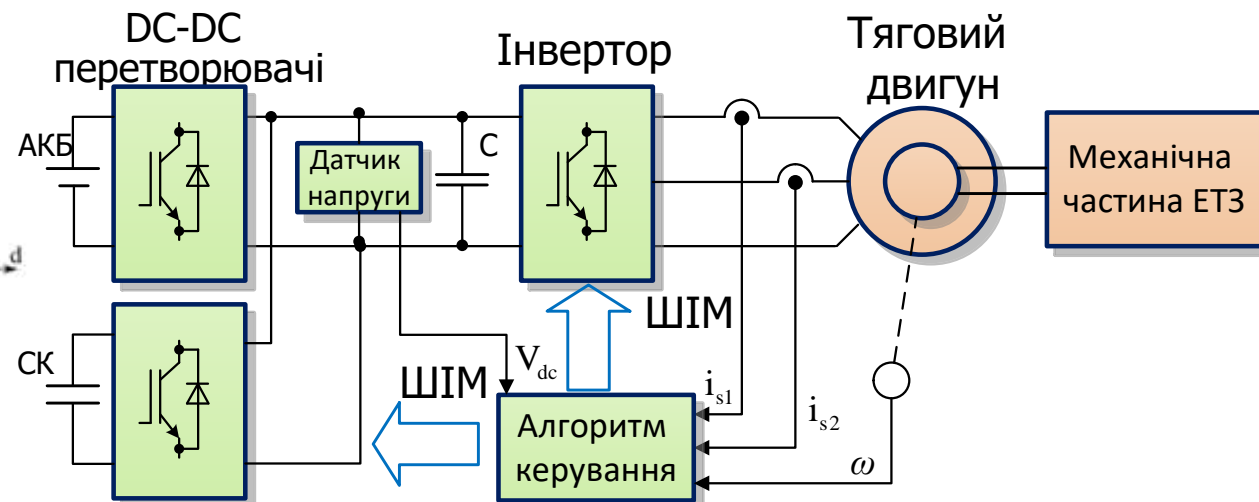
# Актуальність і мета проекту

Проект спрямований на розвиток електричного транспорту за рахунок впровадження нового покоління високоефективних **електромеханічних систем (ЕМС)** з тяговим електроприводом (ТЕП) на базі **асинхронних (АД)** і **синхронних реактивних двигунів (СРД)**, які не використовують **рідкоземельні постійні магніти**, що дозволить подолати проблему їх **обмеженої доступності**.

Метою роботи є підвищення динамічних та енергетичних характеристик **тягових ЕМС на основі СРД і АД** за рахунок розробки та впровадження **нових методів нелінійного та адаптивного керування** електромеханічним перетворенням енергії в ТЕП та процесами енергообміну між ТЕП і **гібридними джерелами живлення (ГДЖ)** на основі акумуляторних батарей (АКБ) і суперконденсаторів (СК).



Розріз синхронного реактивного двигуна. а) геометрія, б) лінії потоку по осі  $d$ , в) лінії потоку по осі  $q$ , г) система координат ( $d$ - $q$ )



Система керування тяговою ЕМС з гібридним джерелом живлення



# Основні наукові результати

1. Розроблено і обґрунтовано альтернативні до існуючих **математичні моделі СРД і АД**, на основі яких розвинуто теорію синтезу та аналізу систем векторного керування **класом глибоко насичених електричних машин**:

**1.1.** 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**.

**1.2.** Нова структура системи керування, яку сформовано на основі синтезу відповідно до п.1.1, **дозволяє** аналітично-чисельним методом формалізувати **оптимізацію за критерієм «момент-струм» МРТА**, **не впливаючи** при цьому на **динамічну поведінку** механічних координат.

2. 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 СРД, АД та СПДМ. **Вперше** з позицій теорії адаптивного керування теоретично **обґрунтовано** можливість **оцінювання змінних у часі параметрів** за рахунок формування «сильних» умов персистентності збудження (загальнотеоретичний результат, світовий пріоритет).

3. 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 ЕП і ГДЖ з **адаптивним обмеженням похідної від струму АКБ**.



# Основні практичні результати

Створена **теоретична основа** для розробки і проектування тягових електромеханічних систем нового покоління, отримано наступні практичні результати:

1. Розроблені ЕМС на основі АД і СРД за своїми динамічними показниками не поступаються кращим зразкам, які використовують двигуни з постійними магнітами, **а за енергоефективністю наближаються до них.**
2. Завдяки нелінійній оптимізації (МТРА) забезпечується **зниження активних втрат потужності до 30% (СРД), 50 % (АД)** в зоні моментів до 50 % від номінального у порівнянні з системами постійного збудження.
3. Розроблені методи ідентифікації параметрів електромеханічних перетворювачів дозволять забезпечити ефективний запуск в експлуатацію електромеханічних систем на основі СРД, а в системах з АД підвищити швидкість визначення параметрів на порядок по відношенню до існуючих систем.
4. В системах з гібридним живленням зменшуються **середні значення струму АКБ і його похідної на 4 % і 93 %** у порівнянні з тільки акумуляторним живленням і **додатково на 2 % і 40 %** за рахунок нового адаптивного методу обмеження похідної струму, що оціночно **подовжує термін роботи АКБ до 30 %.**
5. Розрахунково і експериментально підтверджено **підвищення інтегрального ККД електромеханічних систем до 6 %.**
6. Вперше в Україні на основі технології швидкого прототипного тестування спроектовано і виготовлено лабораторний комплекс для проведення широкого спектру експериментальних досліджень систем векторного керування СРД, АД, СДПМ, який базується на **високошвидкісних інверторах на силікон-карбідних силових транзисторах (вперше в Україні),** а також IGBT ключах.  
Разом з модулем ГДЖ лабораторний комплекс дозволяє здійснювати **експериментальне тестування** прототипів тягових електромеханічних систем різної конфігурації.



# Основні практичні результати Лабораторний комплекс

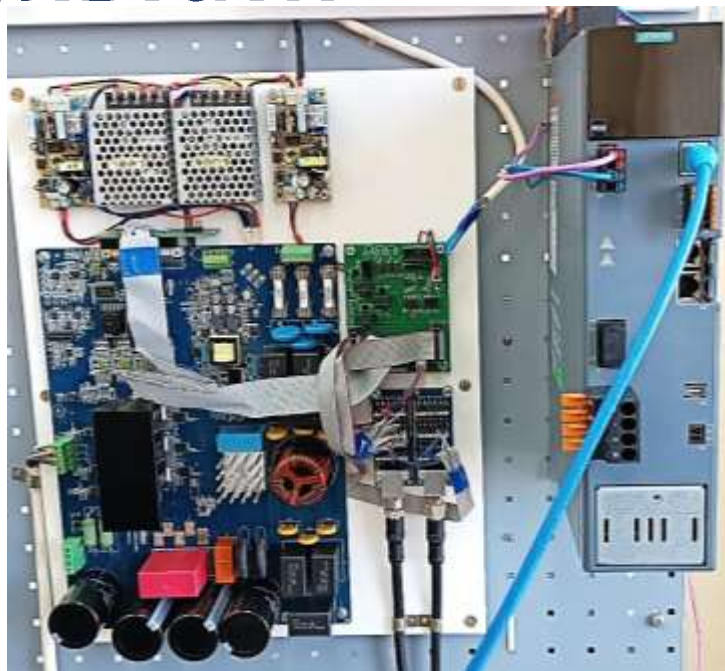


Лабораторний комплекс дозволяє виконувати практичну реалізацію та дослідження розроблених в роботі структур керування АД, СРД, СДПМ і ГДЖ на цифрових контролерах з високим ступенем готовності технології. Лабораторні дослідні зразки: а) тягових асинхронних електроприводів потужністю 50 кВт, 100 кВт, 180 кВт; б) лабораторні масштабовані прототипи електроприводів: з СДПМ 3 кВт, СРД 1.5 кВт; в) генеруючі модулі з асинхронним генератором і МПЖ 2.2 кВт.

Електромеханічна система на основі розробленого векторного керування СРД є унікальною не тільки для України, аналоги існують лише у декількох університетах світу.



# Основні практичні результати



Силовий перетворювач з транзисторами на основі силікон-карбіду, перетворювач Siemens та контролер Speedgoat

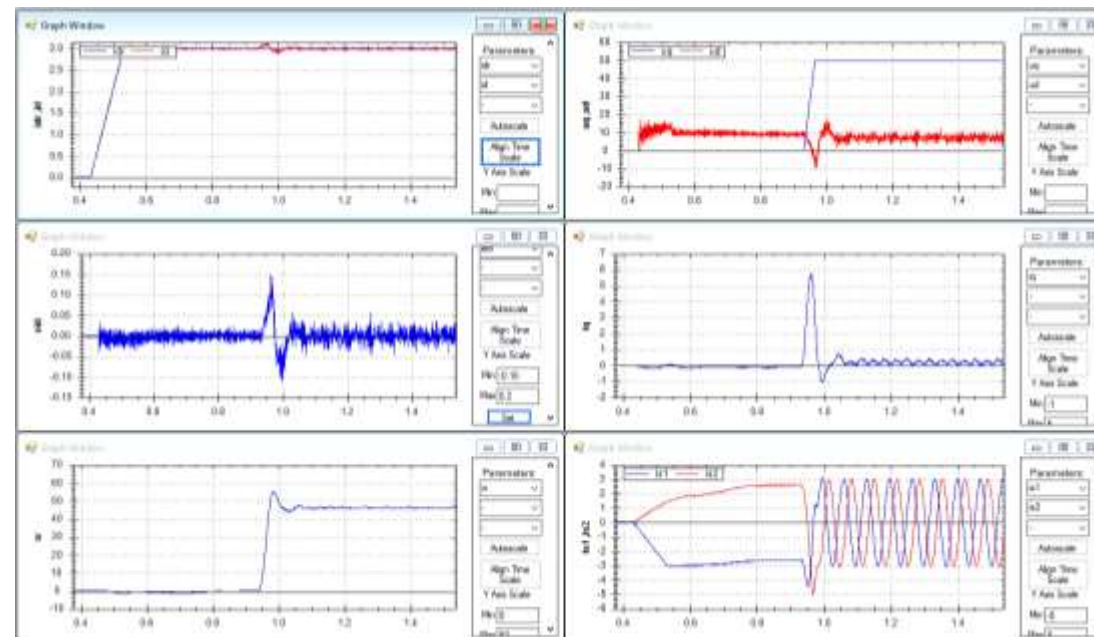
Пара «СДПМ – асинхронний двигун»



Пара «синхронний реактивний двигун – СДПМ»



СДПМ низької напруги



Програмне забезпечення для візуалізації динамічних процесів



# Порівняльна таблиця показників:

<b>Відповідно до проектної заявки</b>	<b>План</b>	<b>Факт</b>
Опубліковано статті у наукових журналах, що входять до наукометричних баз даних WoS та/або Scopus, або публікації у виданнях, які містять інформацію, що становить державну таємницю для проектів оборонного і подвійного призначення, <i>кількість</i>	8	13
Опубліковано за темою проєкту статті у фахових виданнях України категорії «Б», статті у періодичних закордонних фахових виданнях, що мають ISSN, а також англomовні тези доповідей у матеріалах міжнародних конференцій, <i>кількість</i>	10	31
Отримано охоронних документів на об'єкти права інтелектуальної власності (патенти на корисну модель і свідоцтва на авторський твір, патент на промисловий зразок, <i>кількість</i> )	6	2
Представлено науково-практичні результати проєкту на міжнародних комунікативних форумах, всеукраїнських та регіональних науково-технічних/промислових виставкових заходах, в мережі підприємств, що підтверджується відповідним сертифікатом чи посиланням на електронну версію заходу/матеріалів/каталогів, <i>кількість</i>	3	15
Укладено господарчі договори, продані ліцензії, отримано грантові угоди як впровадження наукових або науково-практичних результатів проєкту, <i>відсоток від загальної суми вартості проєкту</i>	55	43
Отримано акти впровадження результатів реалізації проєктів у господарську практику органів державної влади, наукоємних підприємств, приватних компаній (на договірній основі) тощо, <i>кількість</i>	2	3
Нові знання, призначені для створення нових або вдосконалення існуючих (матеріалів, продуктів, пристроїв, систем, технологій - як завершене комплексне рішення).	ТАК	ТАК
<b>Відповідно до технічного завдання (додаткові)</b>		
Монографія українською мовою	1	1
Дисертації PhD	2	2
<b>Показники, що не планувалися, але були виконані</b>		
Колективна монографія мовами Євросоюзу	-	1
Підручник з грифом Вченої Ради КПІ ім. Ігоря Сікорського	-	1
Навчальні посібники з грифом Методичної Ради КПІ ім. Ігоря Сікорського	-	6



# Основні статті у виданнях, що індексуються Scopus

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," <i>IEEE Transactions on Energy Conversion</i> , pp. 1-11, 2023. <a href="https://doi.org/10.1109/TEC.2023.3277478">https://doi.org/10.1109/TEC.2023.3277478</a> .	Q1, IF 4.9
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 <i>IEEE Transactions on Transportation Electrification</i> , 2023 <a href="https://doi.org/10.1109/TTE.2023.3337771">https://doi.org/10.1109/TTE.2023.3337771</a> .	Q1, IF 7
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. <i>Energies</i> , 2022, 15, p. 2207. <a href="https://doi.org/10.3390/en15062207">https://doi.org/10.3390/en15062207</a> .	Q2, IF 3.2
4.	S. Peresada, Y. Nikonenko, S. Kovbasa, D. Rodkin and O. Kiselychnyk, "Observer-based speed estimation for vector controlled induction motors", <i>Technical Electrodynamics</i> , 2022, vol. 1, pp. 25-32. <a href="https://doi.org/10.15407/techned2022.05.045">https://doi.org/10.15407/techned2022.05.045</a> .	Q3, IF 0.6
5.	С.М. Пересада, Є.О. Ніконенко, С.М. Ковбаса, О. Кузнєцов, «Спостерігач потокозчеплення, адаптивний до змін активного опору ротора асинхронних двигунів», <i>Технічна електродинаміка</i> , 2022, № 5 (вересень/жовтень), с. 45-51, <a href="https://doi.org/10.15407/techned2022.05.045">https://doi.org/10.15407/techned2022.05.045</a> .	Q3, IF 0.6
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», <i>Technical Electrodynamics</i> , 2023, №. 2, pp. 37-44. DOI: <a href="http://dx.doi.org/10.15407/techned2023.02.037">http://dx.doi.org/10.15407/techned2023.02.037</a> .	Q3, IF 0.6
7.	С.М. Пересада, Є.О. Ніконенко, С.М. Ковбаса, О. Кузнєцов, «Адаптивні спостерігачі частоти двофазних та однофазних гармонічних сигналів», <i>Технічна електродинаміка</i> , 2023, № 1, с. 25-33. DOI: <a href="http://dx.doi.org/10.15407/techned2023.01.025">http://dx.doi.org/10.15407/techned2023.01.025</a> .	Q3, IF 0.6





# Монографії та підручники

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](https://doi.org/10.1007/978-981-19-0193-5_42).

С. М. ПЕРЕСАДА, С. М. КОВБАСА,  
Є. О. НІКОНЕНКО, С. С. ДИМКО

**ВЕКТОРНЕ КЕРУВАННЯ  
АСИНХРОННИМИ ДВИГУНАМИ  
З МАКСИМІЗАЦІЄЮ СПІВВІДНОШЕННЯ  
МОМЕНТ - СТРУМ СТАТОРА**

$$\dot{\psi} = \frac{1}{T} (M - M_r), M = \frac{3}{2} \frac{L_r}{L_s} (\psi_r i_{s\alpha} - \psi_s i_{r\alpha})$$
$$\dot{i}_{s\alpha} = -\gamma i_{s\alpha} + \omega_r i_{s\beta} + \alpha \beta \psi_{s\alpha} + \beta \omega \psi_{s\beta} + \frac{1}{\sigma} i_{r\alpha}$$
$$\dot{i}_{s\beta} = -\gamma i_{s\beta} - \omega_r i_{s\alpha} + \alpha \beta \psi_{s\beta} - \beta \omega \psi_{s\alpha} + \frac{1}{\sigma} i_{r\beta}$$
$$\dot{\psi}_{s\alpha} = -\alpha \psi_{s\alpha} + (\omega_s - \omega) \psi_{s\beta} + \alpha L_r i_{r\alpha}$$
$$\dot{\psi}_{s\beta} = -\alpha \psi_{s\beta} - (\omega_s - \omega) \psi_{s\alpha} + \alpha L_r i_{r\beta}$$
$$\dot{\psi}_r = \omega_r \psi_r(0) = 0$$

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ  
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ  
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»

С. В. БОЖКО, С. М. ПЕРЕСАДА, М. В. ПЕЧЕНИК, О. І. ТОЛОЧКО

**ЦИФРОВЕ КЕРУВАННЯ  
ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНИМИ  
СИСТЕМАМИ**

Дипломна робота виконана КПІ ім. Ігоря Сікорського  
як підручку для студентів,  
які навчаються за спеціальністю 141 «Електроенергетика, електротехніка  
та електромеханіка» за освітньою програмою «Електромеханічні системи автоматизації,  
електропривод та електромобільність»

Київ  
КПІ ім. Ігоря Сікорського  
2022

Lecture Notes in Electrical Engineering 870

Jitendra Kumar  
Manoj Tripathy  
Premalata Jena Editors

**Control  
Applications in  
Modern Power  
Systems**

Select Proceedings of EPREC 2021



## Захищені дисертації доктора філософії

Ніконенко Є.О. Керування електромеханічними системами електричних транспортних засобів з гібридним акумуляторно-суперконденсаторним джерелом живлення. Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 141 – Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка. – Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», Київ, 2023. Науковий керівник – д.т.н. проф. >С.М. Пересада<.

Землянухіна Г.Ю. Бездавачеве керування електромеханічними системами турбомеханізмів з використанням технології нейромереж. Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 141 – Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка. – Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», Київ, 2023. Науковий керівник – к.т.н. доц. >С.О. Бур'ян<.

## Договори міжнародного співробітництва

Договори міжнародного співробітництва (MOU) з Ноттінгемським університетом (Великобританія) та RIT (Рочестерський технологічний інститут, США).

Підготовлено запит, отримано фінансування за програмою Erasmus+ між ТНМ (Університет прикладних наук Міттелхессена, Німеччина) і КПІ ім. Ігоря Сікорського на 2023-2024 рр.

В стадії подання міжнародний проект між RIT (Рочестерський технологічний інститут, США), КПІ ім. Ігоря Сікорського, Талліннським університетом технологій, Краківською політехнікою «Exploratory research in robust machine learning for object detection and classification» відповідно до фінансування Національним фондом досліджень США (NSF).



# Контакти з бізнесом

№	Реквізити замовників, з якими велися переговори	Документи, якими зафіксовано переговори
1.	ПрАТ «Запорізький електроапаратний завод», м. Запоріжжя, Південне шосе, буд.9	Попередні роботи в рамках договору №487 від 01.07.2016.
2.	Корпорація «Богдан», м. Київ вул. Новокостянтинівська 8-А	Договір про співробітництво з КПІ ім. Ігоря Сікорського
3.	ТОВ «АВМ АМПЕР», м. Кременчук, вул. Троїцька, 6	Лист підтримки
4.	ТОВ Політехносервіс, м. Бровари, вул. Москаленка Сергія, 16-Г/19	Лист підтримки, виконані госпрозрахункові договори № 12/3 від 12 березня 2020 р, ДНДЧ/ 0201.01/1650.01/199/200 від 23.11.2022р, ДНДЧ/0201.01/1650.01/208/200 від 30.11.2022р

Укладено господарчі договори, продані ліцензії, отримано грантові угоди як впровадження наукових або науково-практичних результатів дослідження із зазначенням обсягів фінансування

№	Повні дані про договори	Передані методики, рекомендації, пропозиції, інші документи;	Обсяг фінансування за договором, тис. грн.
1.	ДНДЧ/0201.01/1650.01/199/200 від 23.11.2022р Консультації з питань моніторингу та діагностики стану електромеханічної системи тролейбуса PTS-12, виконавці: <u>Пересада С. М., Ковбаса С. М.</u>	Рекомендації щодо побудови підсистеми діагностики електромеханічної системи тролейбуса PTS-12.	31 200
2.	ДНДЧ/0201.01/1650.01/208/200 від 30.11.2022р «Розроблення технічної документації на систему автоматизації тролейбуса PTS-12» виконавці <u>Пересада С. М., Ковбаса С. М., Сергієнко О. В., Волянський Р. С.</u>	Рекомендації щодо автоматизації електромеханічної системи тролейбуса PTS-12.	75 000
3.	Грант на закупку обладнання за договором співробітництва з Університетом прикладних наук Гессена, що фінансувався DAAD	Передано обладнання для створення лабораторії з дослідження систем керування асинхронними, синхронними з постійними магнітами та синхронними реактивними двигунами і передано в КПІ ім. Ігоря Сікорського.	320 000



# Інноваційна складова

## Назва потенційного об'єкту впровадження

1. Алгоритми ідентифікації параметрів електромеханічних перетворювачів без рідкоземельних матеріалів
2. Алгоритми векторного керування координатами електромеханічних перетворювачів без рідкоземельних матеріалів
3. Алгоритми енергоефективного керування електромеханічними перетворювачами.
4. Програмна реалізація розроблених структур по пунктам 1 – 3 на цифрових сигнальних процесорах.
5. Лабораторний дослідний зразок векторно-керованого електроприводу на основі синхронного реактивного двигуна
6. Лабораторні дослідні зразки векторно-керованого електроприводу на основі асинхронного двигуна (2.2 кВт, 100 кВт, 180 кВт)
7. Лабораторний дослідний зразок векторно-керованого електроприводу на основі синхронного двигуна з постійними магнітами



Лабораторні дослідні зразки електроприводів на основі керуючих контролерів TMS320F28335



# Охорона об'єктів права інтелектуальної власності

1	Номер заявки u 2023 03698. Автори: <u>Пересада С.М., Ковбаса С.М., Стаценко О.В.</u> Пристрій для тестування електромеханічних систем електричних транспортних засобів
2	Номер заявки s202305882 Автори <u>Пересада С.М., Ковбаса С.М., Волянський Р.С.</u> , Визначення стійкості систем векторного керування напругою асинхронного генератора

## Ступінь готовності розробки до виходу на ринок

TRL 4 – Технологія, перевірена в лабораторії, наявний лабораторний прототип  
(<https://io.kpi.ua/trl/>)



# Перспективи розвитку проєкту

## Плани авторів проєкту щодо подальших кроків

1. Продовження співробітництва з ТОВ «ПОЛІТЕХНОСЕРВІС» (заплановано підписання госпрозрахункового договору на суму 250 тис. грн. у січні 2024 р.)
2. Розвиток міжнародного співробітництва відповідно до договорів міжнародного співробітництва (MOU) з Ноттінгемським університетом (Великобританія) та RIT (Рочестерський технологічний інститут, США).

## Привабливість для бізнесу

1. 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).



# Впровадження результатів в навчальний процес

Подальший розвиток нової освітньої програми *«Електромеханічні системи автоматизації, електропривод та електромобільність»*

Дисципліни магістерського рівня

«Робастне та адаптивне керування в електротехнічних системах»,

«Системи керування електричних транспортних засобів»

Дисципліна бакалаврського рівня

«Електромобільність»

Створений лабораторний комплекс може використовуватися при підготовці кваліфікаційних робіт докторів філософії та магістрів.



# Впровадження результатів в навчальний процес

(магістерська дисертація, Б. Бугайчук, ТОВ «АВМ АМПЕР»)



Зовнішній вигляд зразка ЕТЗ



Тяговий двигун (АД) з редуктором





# Впровадження результатів в навчальний процес

(магістерська дисертація, О. Вошкулат, впроваджено в лабораторну роботу курсу «Системи керування електричних транспортних засобів»)



# Супутні результати: привод керма автономного транспортного засобу



СДПМ для автономного ЕТЗ