

## ВІДГУК

офіційного опонента на дисертаційну роботу  
Ніконенка Євгена Олексійовича  
на тему «Керування електромеханічними системами електричних  
транспортних засобів з гібридним акумуляторно-суперконденсаторним  
джерелом живлення»,  
представлену на здобуття ступеня доктора філософії  
в галузі знань «Електрична інженерія»  
за спеціальністю «141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»

### **Актуальність теми дисертації**

Типові сучасні електричні транспортні засоби (ЕТЗ) живляться від літій-іонних акумуляторних батарей (АКБ). Вони мають підвищені енергетичні показники, однак, як і всі електрохімічні джерела енергії, їх внутрішня структура є залежною від режиму заряду і розряду. Для електричних транспортних засобів є типовими режими, які потребують пришвидшеного заряду/розряду, що зменшує термін роботи АКБ.

Останні два десятиліття науковим суспільством активно досліджується заміна традиційного живлення на так зване гібридне джерело живлення (ГДЖ), яке додатково до АКБ має блок суперконденсаторів (СК) і DC-DC перетворювачі для керування потоками потужності. Завдяки окремому керованому джерелу живлення досягаються покращені характеристики використання енергії АКБ, що зберігає їх термін служби.

Системи керування повністю активними ГДЖ базуються на використанні каскадної структури із внутрішніми регуляторами струмів АКБ і СК, зовнішнім регулятором напруги і фільтрі низьких частот (ФНЧ) для розподілу струмів. Типові системи керування не мають доказу стійкості, а відсутність врахування нелінійної немінімально-фазової динаміки відпрацювання вихідної напруги ГДЖ призводить до обмеженої зони стійкості в умовах швидкодіючих навантажень з боку тягового електроприводу (ЕП). Не є остаточно розв'язаними значна кількість задач керування тяговими електромеханічними системами (ЕМС) змінного струму в частині ослаблення поля, а також визначення параметрів моделей DC-DC перетворювачів, асинхронних (АД) і синхронних двигунів зі збудженням від постійних магнітів (СДПМ).

Дисертаційна робота Ніконенка Є.О. направлена на вирішення актуального наукового завдання, яке полягає у покращенні показників якості керування та

енергетичної ефективності процесу електромеханічного перетворення за рахунок розробки методів і синтезу на їх основі алгоритмів керування електромеханічними системами електричних транспортних засобів, які живляться від гібридних джерел живлення.

Актуальність виконання наукової роботи підтверджено дослідженнями, які проводились протягом 2019-2020 років в лабораторії інформаційних технологій, електротехніки та мехатроніки Університету прикладних наук Міттелхессена (Німеччина). Робота виконувалась, також, у Національному технічному університеті України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» в рамках держбюджетних НДР «Розробка енергоефективної електромеханічної системи електробусу на основі адаптивного векторно-керованого асинхронного електроприводу з акумуляторно-суперконденсаторним живленням», «Адаптивне векторне керування з оптимізацією втрат потужності для електромеханічних систем електричних транспортних засобів з підвищеними динамічними та енергетичними характеристиками», «Нове покоління вискоефективних електромеханічних систем електричних транспортних засобів з векторно-керуваними двигунами, які не містять рідкоземельних матеріалів».

### **Оцінка обґрунтованості наукових результатів дисертації, їх достовірності та новизни**

Проведені в роботі дослідження із застосуванням фундаментальних положень теорії автоматичного керування, теорії мехатронних систем, теорії електроприводу, математичного моделювання з різним рівнем деталізації, сучасних комп'ютерних програм чисельного дослідження розроблених математичних моделей і фізичних експериментів відповідають поставленим задачам дисертаційної роботи та забезпечують достатньо ефективно їх розв'язання і досягнення поставленої мети.

Результати математичного моделювання порівнювалися з відповідними експериментальними, отриманими на розробленій дослідницькій платформі. Узгодження результатів підтверджує адекватність використаних математичних моделей та результатів, які були одержані аналітичними методами.

Наведеними аргументами підтверджується достовірність наукових результатів, основних положень і висновків досліджень.

**Наукова новизна** результатів дисертаційного дослідження полягає в наступному:

1. Розроблено новий метод аналізу та синтезу алгоритмів керування напругою реверсивних DC-DC перетворювачів, який базується на частково лінеаризуючому зворотнім зв'язком керуванні нелінійним немінимально-фазовим об'єктом з подальшою лінеаризацією рівнянь динаміки в околі траєкторій руху, що відповідають балансу потужностей перетворювача, завдяки чому можливе застосування існуючих методів аналізу стійкості лінійних систем зі змінними параметрами з подальшою оптимізацією параметрів регуляторів.
2. Обґрунтовано структуру системи керування ГДЖ і визначено закономірності впливу масштабування заданого струму СК та розділення у часі процесів регулювання струмів батареї і суперконденсаторів, вихідної напруги DC-DC перетворювача і усередненої напруги СК.
3. Теоретично обґрунтовано структуру зворотних зв'язків адаптивних спостерігачів і алгоритмів ідентифікації параметрів АД та СДПМ, а також стандартної конфігурації DC-DC перетворювачів, що забезпечує адаптивне визначення параметрів їх динамічних моделей без попередньої інформації про них.

**Практична цінність** результатів роботи полягає у тому, що:

1. Розроблена система керування ГДЖ забезпечує стабілізацію вихідної напруги, динамічний розподіл струмів АКБ і СК з накладанням повільного процесу підтримки напруги СК, завдяки чому покращуються характеристики використання струму АКБ, зменшуються втрати і подовжується термін їх служби.

2. Розроблена структура системи векторного керування моментом асинхронного електроприводу з ослабленням поля дозволяє збільшити максимальне значення динамічної потужності.

3. Запропонована методика та рекомендації з розрахунку параметрів регуляторів DC-DC перетворювачів, ГДЖ та векторно-керованих електроприводів є доступними з інженерної точки зору і дозволяють здійснювати швидке налаштування підсистем керування відповідно до заданих динамічних показників якості.

4. Сформовано концепцію експериментальних досліджень ЕМС електричних транспортних засобів з гібридним живленням, що дозволяє виконувати прототипні тестування систем керування в наближених умовах до реальних електромобілів з набагато зниженою вартістю ніж реальні ЕТЗ.

5. Спроековано та виготовлено дослідницьку платформу, яка вміщує векторно-керовані АД потужністю 0.75 кВт, СДПМ 3 кВт, свинцево-кислотні і літій-іонні АКБ, блок СК, DC-DC перетворювачі та емулятор ЕТЗ для експериментального дослідження алгоритмів керування, а також програмне забезпечення для моделювання систем керування.

Матеріали дисертаційної роботи застосовуються у навчальному процесі Національного технічного університету України «КПІ ім. Ігоря Сікорського» під час викладання дисциплін «Електромеханічні системи електричних транспортних засобів» та «Керування перетворенням енергії в відновлюваних джерелах та електромобілях» для підготовки здобувачів вищої освіти освітнього ступеню «бакалавр» за спеціальністю 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка» в лекціях, практичних і лабораторних заняттях.

Основні наукові результати дисертації коректно представлено у восьми пунктах загальних висновків.

Алгоритм керування DC-DC перетворювачами впроваджено в ТОВ «Політехносервіс» (м. Бровари).

Отже, в дисертаційній роботі поставлене наукове завдання виконано повністю, здобувач повною мірою оволодів методологією наукової діяльності.

Обґрунтовані в дисертації рішення дають змогу застосувати запропоновані алгоритми керування і дослідницьку платформу в розробках нових електричних транспортних засобів.

### **Оцінка змісту дисертації, її завершеність та дотримання принципів академічної доброчесності**

За своїм змістом дисертаційна робота здобувача Ніконенка Є.О. повністю відповідає предметній області спеціальності «141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка» та напрямкам досліджень відповідно до фокусу освітньо-наукової програми «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка» НТУУ «КПІ ім. Ігоря Сікорського».

Дисертаційна робота є завершеною науковою працею, що засвідчує особистий внесок здобувача у науковий напрям «Електромеханічне перетворення та передача енергії».

Розглянувши звіт подібності за результатами перевірки дисертаційної роботи на текстові співпадиння, можна зробити висновок, що дисертаційна робота Ніконенка Євгена Олексійовича є результатом самостійних досліджень

здобувача і не містить елементів фальсифікації, компіляції, фабрикації, плагіату та запозичень. Використані ідеї, результати і тексти інших авторів мають належні посилання на відповідне джерело.

### **Мова та стиль викладення результатів**

Дисертаційна робота написана українською мовою.

Матеріали викладено логічно послідовно; застосований стиль написання є науковим, з врахуванням актуальної міжнародної і вітчизняної термінології.

Дисертація складається зі вступу, 5 розділів, висновків, списку використаної літератури зі 154 позицій та 4 додатків. Загальний обсяг дисертації складає 189 сторінок, робота ілюстрована 81 рисунком та містить 21 таблицю.

У *вступі* представлена актуальність теми дисертаційної роботи, сформульовані мета, об'єкт, предмет, задачі та методи досліджень, визначені наукова новизна, практичне значення отриманих результатів та результати апробації роботи.

У *першому розділі* здійснено аналіз конфігурацій систем електроприводу повністю електричних транспортних засобів. Здійснено огляд топологій первинного джерела живлення, які застосовуються в транспортних засобах, проаналізовано їх переваги та недоліки. Проаналізовано існуючі системи керування електромеханічними системами ЕТЗ, які враховують алгоритми керування ЕП і ГДЖ, а також алгоритми ідентифікації їх параметрів. Описано досліджувані в дисертаційній роботі підсистеми загальної ЕМС електромобіля. Показано, що для збереження терміну служби АКБ, керування потоками потужності і збільшення ефективності перетворення енергії необхідним є застосування повністю керованих ГДЖ.

У *другому розділі* розроблено систему векторного керування моментом асинхронного електроприводу з ослабленням поля, яка забезпечує збільшення максимального значення динамічної потужності. Теоретично обґрунтовано структуру зворотних зв'язків адаптивного спостерігача АД і алгоритмів ідентифікації параметрів СДПМ, які забезпечують адаптивне визначення параметрів їх динамічних моделей без попередньої інформації про них.

*Третій розділ* дисертаційної роботи присвячено розробці нового методу аналізу і синтезу алгоритмів керування напругою реверсивних DC-DC перетворювачів. Метод базується на частково лінеаризуючому зворотним зв'язком керуванні нелінійним немінимально-фазовим об'єктом і лінеаризації

рівнянь динаміки в околі траєкторій руху, які відповідають балансу потужностей перетворювача. Як результат, це дає можливість застосування існуючих методів аналізу стійкості лінійних систем зі змінними параметрами з оптимізацією параметрів регуляторів. Запропоновано методику розрахунку параметрів регуляторів струму і напруги DC-DC перетворювачів, яка є доступною з інженерної точки зору. Теоретично обґрунтовано структуру алгоритму ідентифікації параметрів динамічної моделі DC-DC перетворювача, який забезпечує їх адаптивне визначення без попередньої інформації про них.

У четвертому розділі обґрунтовано структуру уніфікованої системи керування ГДЖ, яка складається з контурів регулювання вихідної напруги, напруги блоку СК, вхідних струмів та фільтру розподілу частот. Визначено закономірності впливу масштабування заданого струму СК і рівня розділення у часі процесів регулювання струмів акумуляторної батареї і суперконденсаторів, вихідної напруги DC-DC перетворювача і усередненої напруги СК. Розроблена система керування забезпечує стабілізацію напруги ланки постійного струму, динамічний розподіл струмів АКБ і СК з накладанням повільного процесу підтримки напруги СК. Внаслідок цього покращуються характеристики використання струму АКБ, зменшуються втрати та продовжується термін їх служби. Надано рекомендації з розрахунку параметрів регуляторів, які дозволяють провести швидке налаштування підсистем керування відповідно до заданих динамічних показників якості.

У п'ятому розділі сформовано концепцію експериментальних досліджень електромеханічних систем електричних транспортних засобів з живленням від ГДЖ, що дозволяє виконувати прототипні тестування систем керування в наближених умовах до реальних електромобілів з набагато зниженою вартістю ніж реальні ЕТЗ. Спроековано, розроблено і налагоджено дослідницьку платформу, яка вміщує векторно-керовані АД потужністю 0.75 кВт, СДПМ 3 кВт, свинцево-кислотні і літій-іонні АКБ, блок СК, DC-DC перетворювачі та емулятор ЕТЗ для експериментального дослідження алгоритмів керування, а також програмне забезпечення для моделювання систем керування. Представлено результати експериментальних досліджень для перевірки основних теоретичних результатів, отриманих автором. При цьому аналізується вплив налаштувань ФНЧ, параметрів траєкторії руху ЕП і налаштувань регулятору напруги СК на показники якості регулювання вихідними координатами і динамічний розподіл струмів. Також створено методику дослідження систем керування ЕМС транспортних засобів з різними джерелами

живлення. Показано, що повністю активна топологія з розробленим алгоритмом керування забезпечує водночас підтримку вихідної напруги ГДЖ на заданому рівні, ефективний розподіл струмів, зменшення використання струму АКБ (зменшення втрат АКБ і подовження терміну їх служби), порівняно з акумуляторним живленням, що є кращим варіантом серед розповсюджених топологій ГДЖ електромобілів.

*Загальні висновки* висвітлюють одержані наукові результати, а також включають основні рекомендації щодо їх використання.

У *додатках* до дисертації наведено класифікацію стратегій керування і короткий опис режимів роботи повністю активних ГДЖ електричних транспортних засобів, номінальні параметри двигунів, перетворювачів і джерел живлення, список публікацій і відомості про апробацію результатів дисертації, а також представлено акти впровадження результатів дисертаційної роботи в навчальний процес та виробничу діяльність підприємства ТОВ "ПОЛІТЕХНОСЕРВІС".

У цілому структура, обсяг та оформлення дисертації відповідають чинним вимогам, які ставляться до дисертацій на здобуття наукового ступеня доктора філософії з галузі знань 14 «Електрична інженерія».

Дисертаційна робота оформлена відповідно до вимог наказу МОН України від 12 січня 2017 р. № 40 «Про затвердження вимог до оформлення дисертації».

### **Оприлюднення результатів дисертаційної роботи**

Наукові результати дисертації відображені у 13 наукових працях, серед яких: 5 статей у наукових виданнях, включених на дату опублікування до переліку наукових фахових видань України; 3 статті у періодичних наукових виданнях, проіндексованих у базі даних Scopus, віднесених до третього квартилю (Q3) відповідно до класифікації SCImago Journal and Country Rank або Journal Citation Reports. Також результати дисертації були апробовані на 7 наукових фахових конференціях.

Це дає змогу зробити висновок про те, що у науково-технічних виданнях є повна інформація про результати досліджень.

Науковий рівень публікацій відповідає рівню провідних наукових видань з електричної інженерії та суміжних галузей. В публікаціях здобувач дотримується етики досліджень і правил академічної доброчесності.

### **Недоліки та зауваження до дисертаційної роботи**

1. Автором поставлено забагато задач дослідження як для дисертації доктора філософії, що значно ускладнило представлення матеріалу.

2. З матеріалів дисертації не зрозуміло, чи дозволяє запропонований алгоритм ослаблення поля АД враховувати насичення магнітної системи двигуна.

3. Алгоритми ідентифікації параметрів АД, СДПМ і DC-DC перетворювачів призначені для визначення їх параметрів в режимах спеціальних тестів. При цьому не зазначено про можливість їх використання в умовах реальної роботи системи, що є найбільш важливим.

4. Новий метод синтезу алгоритму керування DC-DC перетворювачами базується на основі лінеаризованої моделі, тобто в «малому». Якою є область притягіння, де це припущення справедливе?

5. Наскільки відомо опоненту, електромеханічні системи з повністю керованими ГДЖ не виробляються серійно для комерційних електромобілів. Автор не надає детальних пояснень.

6. В оформленні дисертації є деякі недоліки у використанні невдалої термінології («швидкість двигуна» замість кутова швидкість на стор. 119, 178, «розкачка напруги» замість відпрацювання початкових умов напруги на стор. 133), оформлення графіків (рис. 2.3, рис. 5.38 та ін.), помилок в рівняннях (див. перше рівняння системи (4.2)).

Зазначені зауваження не є принциповими і такими, що піддають сумніву вагомимі результати досліджень. Вони не впливають на загальну позитивну оцінку дисертаційної роботи Ніконенка Є.О.

### **Висновок про дисертаційну роботу**

Вважаю, що дисертаційна робота здобувача ступеня доктора філософії Ніконенка Євгена Олексійовича на тему «Керування електромеханічними системами електричних транспортних засобів з гібридним акумуляторно-суперконденсаторним джерелом живлення» виконана на високому науковому рівні, не порушує принципів академічної доброчесності та є закінченим науковим дослідженням, сукупність теоретичних та практичних результатів якого розв'язує наукове завдання, що має істотне значення для галузі знань «Електрична інженерія». Дисертаційна робота за актуальністю, практичною



цінністю та науковою новизною повністю відповідає вимогам чинного законодавства України, що передбачені в п. 6–9 «Порядку присудження ступеня доктора філософії та скасування рішення разової спеціалізованої вченої ради закладу вищої освіти, наукової установи про присудження ступеня доктора філософії», затвердженого Постановою Кабінету Міністрів України від 12 січня 2022 р. № 44.

Здобувач Ніконенко Євген Олексійович заслуговує на присудження ступеня доктора філософії в галузі знань «Електрична інженерія» за спеціальністю «141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка».

**Офіційний опонент:**

Завідувач кафедри електричної  
інженерії та інформаційно-  
вимірювальних технологій  
Національного університету  
"Чернігівська політехніка",

к.т.н., доц.



Анатолій ПРИСТУПА

М.П. « 12 » 10



2023 року

Підпис А. Приступа  
засвідчую  
Олександр  
відділу кадрів  
« 12 » 10 2023 р.