

## **РЕЦЕНЗІЯ**

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 14–Електрична інженерія

за спеціальністю 141–Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка

### **Актуальність теми дисертації.**

Перехід до автономних електричних транспортних засобів дозволяє позбавитися залежності економіки від викопних видів палива, зменшити викиди шкідливих речовин і вуглекислого газу. Тягові електромеханічні системи електричних транспортних засобів будуються на основі векторно-керованих асинхронних двигунів та синхронних двигунів з постійними магнітами. Гібридні джерела живлення на основі акумуляторних батарей, блоку суперконденсаторів та DC-DC перетворювачів є перспективним рішенням для тягових електромеханічних систем. Стандартні системи керування з гібридними джерелами живлення мають конфігурацію з лінійними пропорційно-інтегральними регуляторами і фільтром низьких частот для частотного розділення струмів за швидкодією між акумуляторною батареєю, блоком суперконденсаторів. Такі системи базуються на припущеннях, основними з яких є нехтування нелінійною динамікою процесу перетворення постійної напруги в постійну за допомогою DC-DC перетворювачів, нехтування динамікою джерел живлення. В результаті підсистеми керування гібридним джерелом живлення і тяговим електроприводом є взаємозв'язаними і чутливими до координатних і параметричних збурень, що призводить до деградації динамічних показників якості керування і зниження енергетичної ефективності процесів електромеханічного перетворення енергії.

Саме тому розробка методів і синтез на їх основі алгоритмів керування тяговими електромеханічними системами з гібридними джерелами живлення, які забезпечують підвищені показники якості керування та енергетичної ефективності, є актуальною науково-прикладною задачею.

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

Наукова новизна результатів дисертаційного дослідження полягає в наступному:

1. Отримала подальший розвиток теорія керування класом DC-DC перетворювачів, які є нелінійними немінимально-фазовими об'єктами керування. Розроблений метод синтезу і аналізу двоконтурних систем керування DC-DC перетворювачами базується на використанні часткової лінеаризації зворотним зв'язком і подальшому використанні лінійних ПІ-регуляторів напруги і струму. Отримана за рахунок цього результуюча структура системи керування вперше дозволяє лінеаризацію відносно фізично обумовленого маніфолду, який представляє собою рівняння балансу потужностей.

2. Вперше, на основі теоретичного аналізу, обґрунтовано структуру композитної системи керування гібридного джерела живлення, що складається зі зв'язаних підсистем регулювання напруги ланки постійного струму, струмів акумуляторної батареї та блоку суперконденсаторів, завдання для яких формується за допомогою фільтра низьких частот, а також підсистеми регулювання усередненого значення напруги блоку суперконденсаторів.

3. Теоретично, за допомогою другого методу Ляпунова, обґрунтовано структуру коригуючих зворотних зв'язків адаптивних спостерігачів активного опору ротора асинхронного двигуна, алгоритмів ідентифікації електричних параметрів синхронного двигуна з постійними магнітами та DC-DC перетворювачів, які, на відміну від існуючих, мають прозорі умови персистентності збудження, що гарантує властивості глобальної експоненційної стійкості, не потребують інформації про їх початкові значення, а також є простішими у використанні.

Наукові дослідження були виконані здобувачем на кафедрі автоматизації електромеханічних систем та електроприводу КПІ ім. Ігоря Сікорського в рамках держбюджетних тем, які фінансувалися МОН України «Розробка енергоефективної електромеханічної системи електробусу на основі адаптивного векторно-керованого асинхронного електроприводу з акумуляторно-суперконденсаторним живленням» (№ ДР 0117U004284, 2017 – 2018 рр.), «Адаптивне векторне керування з оптимізацією втрат потужності для електромеханічних систем електричних транспортних засобів з підвищеними динамічними та енергетичними характеристиками» (№ ДР 0119U100170, 2018 – 2021 рр.), «Нове покоління високоефективних електромеханічних систем електричних транспортних засобів з векторно-керованими двигунами, які не містять рідкоземельних матеріалів» (№ ДР № 0122U001700, 2022 – 2023 рр.). Частина досліджень виконувалася в рамках міжвузівського співробітництва з Університетом прикладних наук Гессена (Німеччина) за напрямком «Порівняння акумуляторного та гібридного джерел живлення електромеханічних систем електричних транспортних засобів» (2019 р.), а також в рамках гранту від

міжнародної організації DAAD «Leonhard-Euler Scholarship» (2019 р.) під керівництвом професора, доктора технічних наук Пересади Сергія Михайловича.

Отже, в дисертаційній роботі поставлене наукове завдання розвитку методів синтезу, теоретичного та практичного дослідження нових алгоритмів керування, які підвищують їх статичні, динамічні та енергетичні характеристики, виконано повністю, здобувач повною мірою оволодів методологією наукової діяльності.

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

За своїм змістом дисертаційна робота здобувача Ніконенка Євгена Олексійовича повністю відповідає Стандарту вищої освіти зі спеціальності 141–«Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка» та напрямкам досліджень відповідно до освітньої програми «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка».

Дисертаційна робота є завершеною науковою працею і свідчить про наявність особистого внеску здобувача у науковий напрям електричної інженерії.

Розглянувши звіт подібності за результатами перевірки дисертаційної роботи на текстові співпадіння, 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. Викладення матеріалу в роботі характеризується логічною послідовністю, об'єктивністю, аргументованістю висновків. Текст роботи написано науковим стилем мовлення з використанням загальноприйнятої термінології із області електричної інженерії.

Дисертація складається з вступу, п'яти розділів, загальних висновків, списку використаних джерел із 154 найменувань та 4 додатків. Загальний обсяг роботи складає 189 сторінок, у тому числі 145 сторінок основного тексту, 81 рисунок і 21 таблицю.

У вступі обґрунтовано доцільність та актуальність роботи, відзначено зв'язок роботи з науковими програмами та планами, сформульовано мету та задачі дослідження, викладено наукову новизну, практичне значення результатів роботи, зазначено особистий внесок здобувача, наведено відомості про апробацію отриманих результатів і публікації.

У першому розділі проведено аналіз існуючих методів керування тяговими електромеханічними системами з гібридними джерелами живлення (ГДЖ) з

метою обґрунтування необхідності вирішення науково-прикладної задачі, яка розглядається в роботі. За результатами аналітичного огляду встановлено, що системи ослаблення поля асинхронного двигуна (АД) не забезпечують повне використання потужності джерела; для живлення типових електричних транспортних засобів (ЕТЗ) використовуються тільки акумуляторні батареї (АКБ), що спричиняє їх прискорене старіння. Типові системи керування ГДЖ на основі лінійних пропорційно-інтегральних регуляторів (ПІ-регуляторів) струмів і напруги з фільтром низьких частот (ФНЧ) не мають строгого теоретичного обґрунтування, стійкість суттєво нелінійних систем не доведено. Як наслідок, підсистеми керування ГДЖ і тяговим електроприводом (ЕП) є взаємозв'язаними і чутливими до координатних і параметричних збурень, основними з яких є варіації активного опору ротора АД, електричних параметрів синхронного двигуна з постійними магнітами (СДПМ) і параметрів DC-DC перетворювачів. Вказані збурення в існуючих системах призводять до деградації динамічних показників якості керування і зниження енергетичної ефективності процесів електромеханічного перетворення енергії.

У другому розділі розроблено нові алгоритми ослаблення поля в системах векторного керування АД, які забезпечують більш повне використання потужності джерела, а також синтезовано з використанням другого методу Ляпунова адаптивний спостерігач активного опору ротора АД і алгоритми ідентифікації параметрів СДПМ, які забезпечують глобально стійкий процес оцінювання і є простішими у використанні, ніж існуючі аналоги.

У третьому розділі виконано теоретичний аналіз та дослідження властивостей стійкості і характеристик систем керування класом реверсивних DC-DC перетворювачів як нелінійних немінимально-фазових об'єктів керування в стандартній конфігурації з лінійними ПІ-регуляторами струму та напруги. Розроблений метод синтезу і аналізу систем керування DC-DC перетворювачами базується на використанні часткової лінеаризації зворотним зв'язком. В результаті теоретичного аналізу встановлено, що: результуюча структура системи керування має вигляд послідовного з'єднання двох лінійних асимптотично стійких підсистем у контурі нелінійного зворотного зв'язку з білінійними властивостями; структура системи керування вперше дозволяє лінеаризацію відносно фізично обумовленої множини рішень, яка представляє собою рівняння балансу потужностей; лінеаризована система набуває форми, яка дозволяє використовувати теорію каскадних систем з розділенням у часі процесів у контурах регулювання так, що процеси у внутрішньому контурі (струму) у декілька разів більш швидкі у порівнянні із зовнішнім (напруги); налаштування регуляторів з оптимізацією за «симетричним» оптимумом дозволяє формувати показники якості керування. Вперше показано яким чином струм навантаження впливає на структуру систем

керування DC-DC перетворювачами та їх параметри, що дозволяє здійснювати робастне налаштування регуляторів для підвищення навантажувальної здатності перетворювачів. Показано, що завдяки компенсації струму навантаження забезпечується підвищення динамічної точності стабілізації напруги. Теоретично, за допомогою другого методу Ляпунова, обґрунтовано структуру коригуючих зворотних зв'язків алгоритму ідентифікації параметрів DC-DC перетворювачів, який, на відміну від існуючих, має прозорі умови персистентності збудження, що гарантує властивості глобальної експоненційної стійкості, не потребує інформації про їх початкові значення, а також має простішу форму.

У четвертому розділі вперше теоретично обґрунтовано структуру композитної системи керування ГДЖ, що складається зі зв'язаних підсистем регулювання вихідної напруги, струмів АКБ і СК, фільтру розподілу частот (ФРЧ) і підсистеми регулювання напруги СК. Доведено, шляхом розгляду динаміки системи зниженого порядку, що масштабування завдання струму СК у функції співвідношення напруг АКБ і СК у складі ФРЧ (лінеаризація зворотним зв'язком), а також формування розділення у часі динаміки у контурах регулювання забезпечують асимптотичне регулювання напруги ланки постійного струму і розподіл динамічних складових струмів АКБ і СК. Показано, що компенсація струму навантаження підвищує динамічні показники якості регулювання напруги. Розроблено новий алгоритм регулювання напруги (заряду) блоку СК і надано рекомендації з його налаштування, яке гарантує, що процес заряду не впливає на регулювання вихідної напруги ГДЖ.

У п'ятому розділі обґрунтовано концепцію експериментальних досліджень тягових ЕМС з ГДЖ, яка дозволяє розробляти уніфіковані експериментальні установки для повномасштабних тестувань широкого спектру алгоритмів керування в умовах, які наближені до існуючих в реальних ЕТЗ. Розроблено структуру, виготовлено і налагоджено станцію швидкого прототипного тестування для дослідження тягових ЕМС, яка складається з АД потужністю 0.7 кВт, СДПМ 3 кВт, літій-іонних і свинцево-кислотних АКБ і блоку СК з DC-DC перетворювачами, яка дозволила провести повномасштабні експериментальні тестування розроблених структур керування з метою підтвердження теоретичних висновків роботи та виявлення ефектів, які не враховуються при синтезі та моделюванні. Керування установкою здійснюється з використанням контролера на основі цифрового сигнального процесора TMS320F28335 та розробленого для нього програмного забезпечення, що в реальному часі реалізує розроблені алгоритми керування. Розроблено методику дослідження динамічних процесів енергообміну між джерелами живлення і тяговим ЕП, яка дозволяє формувати струми навантаження, які відповідають типовим діаграмам руху ЕТЗ і дають можливість оцінювати ефективність розподілу струмів між АКБ і СК на кожній з

ділянок руху ЕТЗ. З результатів верифікації параметрів АКБ і блоку СК і дослідження динамічних режимів DC-DC перетворювачів встановлено, що стандартні моделі АКБ та СК на основі обґрунтованих припущень поєднують простоту та достатню точність для дослідження процесів енергообміну в тягових ЕМС. Проведено цикл повномасштабних досліджень ГДЖ тягових ЕМС, який включає відпрацювання навантажень сформованих діаграмами руху ЕТЗ. Результати експериментальних досліджень співпадають з результатами математичного моделювання з достатньою точністю для комплексних тягових ЕМС. З порівняльного тестування встановлено, що розроблений алгоритм керування повністю керованими ГДЖ забезпечує зменшення інтегральних середньоквадратичних значень струму елементу АКБ і його похідної, порівняно з живленням від АКБ і типових топологій ГДЖ, що сприяє зниженню втрат і подовженню терміну експлуатації АКБ. Встановлено, що серед розглянутих топологій повністю керовані ГДЖ мають найкращі властивості регулювання напруги, розподілу струмів між АКБ і СК та обмеження струму АКБ.

Результати роботи впроваджено: в ТОВ «Політехносервіс» (м. Бровари) та в освітній процес у Київському політехнічному інституті імені Ігоря Сікорського для вдосконалення лекційних курсів та оновлення циклів лабораторних робіт дисциплін «Електромеханічні системи електричних транспортних засобів» і «Керування перетворенням енергії в відновлюваних джерелах та електромобілях». Подальше впровадження результатів дисертації рекомендується на підприємствах електротехнічного профілю України.

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 висвітлені у 13 наукових публікаціях здобувача, серед яких: 6 статей у наукових виданнях, включених на дату опублікування до переліку наукових фахових видань України, з них 3 статті у періодичних наукових виданнях проіндексованих у базах даних Scopus та віднесених до третього квартиля Q3 відповідно до класифікації SCImago Journal and Country Rank або Journal Citation Reports.

Основні теоретичні положення, результати і висновки дисертаційної роботи доповідалися і обговорювалися на міжнародних науково-технічних конференціях: IEEE «Electrical Systems for Aircraft, Railway, Ship Propulsion and Road Vehicles & International Transportation Electrification Conference» ESARS-ITEC (Nottingham, UK, 2018), IEEE «Problems of Automated Electric Drive. Theory and Practice» PAEP (Kharkiv, 2020), IEEE «Electronics and Nanotechnology» ELNANO (Kyiv, 2019, 2020), IEEE International Conference «Modern Electrical and Energy Systems» MEES

(Kremenichuk, 2017, 2019, 2022), IEEE «Energy Smart Systems» ESS (Kyiv, 2020, 2022), IEEE Ukraine Conference «Electrical and Computer Engineering» UKRCON (Kyiv, 2019, 2021), IEEE KhPI Week on Advanced Technology KhPIWeek (Kharkiv, 2022), Workshop at the School of Engineering, University of Warwick (Coventry, UK, 2019), Workshop «Advanced Control in Power Systems and Drives» (Friedberg, Germany, 2019), «Проблеми сучасної електротехніки» ПСЕ (Київ, 2018, 2020, 2022), «Проблеми автоматизованого електроприводу. Теорія і практика» ПАЕП (Харків, 2017), «Оптимальне керування електроустановками» ОКЕУ (Вінниця, 2022), «Електромеханічні та енергетичні системи. Методи моделювання та оптимізації» ESMO (Кременчук, 2017, 2018), «Сучасні проблеми електроенергетичної та автоматики» СПЕА (Київ, 2017 – 2023), «Проблеми та перспективи розвитку енергетики, електротехнологій та автоматики в АПК» ПРЕАП (Київ, 2019), «Молодь в науці: дослідження, проблеми, перспективи» (Вінниця, 2022), конкурс студентських наукових робіт «Електротехніка та електромеханіка» ЕтЕ (Кам'янське, 2018).

Публікації здобувача оформлені на високому науковому рівні, основні положення та результати дисертаційної роботи отримані автором особисто, порушення принципів академічної доброчесності не виявлено. Особистий внесок здобувача до всіх публікацій, опублікованих у співавторстві наведений у вступі дисертації.

Таким чином, наукові результати описані в дисертаційній роботі повністю висвітлені у наукових публікаціях здобувача.

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

1. В роботі поставлено для вирішення шість задач досліджень, що є забагато для дисертацій доктора філософії. Зазвичай у дисертації вирішується три-чотири задачі. Більш раціональним було б узагальнення декількох зв'язаних задач роботи.
2. Формулювання наукового завдання та мети дисертаційної роботи не в повній мірі співпадають між собою.
3. Висвітлення кожної задачі дослідження чітко не відображено у змісті роботи. Було б доцільним назву розділу або підрозділу дисертації назвати та присвятити відповідній задачі дослідження.
4. У висновках дисертації не зовсім чітко відображено результати вирішення кожної з задач дослідження. Вони розпорошені серед восьми пунктів висновків.
5. У меті роботи та науковому завданні, крім підвищення якості керування, підкреслено про підвищення енергетичних характеристик тягових електромеханічних систем, проте у загальних висновках про це не зазначено.

Вважаю, що висловлені зауваження не є визначальними і не зменшують загальну наукову новизну та практичну значимість результатів та не впливають на позитивну оцінку дисертаційної роботи.

### **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 електричної інженерії. Дисертаційна робота за актуальністю, практичною цінністю та науковою новизною повністю відповідає вимогам чинного законодавства України, що передбачені в пп.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 14–«Електрична інженерія» за спеціальністю 141–«Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»

### **Рецензент:**

завідувач кафедри теоретичної електротехніки Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», доктор технічних наук, професор



« 02 » 10 2023 року

