

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 «Електрична інженерія»

за спеціальністю «141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»

Актуальність теми дисертації

Науково-технічні дослідження в галузі електричних транспортних засобів (ЕТЗ) проводяться в усіх провідних університетах світу, у більшості компаній виробників автомобілів та електротехнічного обладнання (наприклад, Siemens, ABB). Оскільки основною частиною електричних транспортних засобів є тягова електромеханічна система (ЕМС), то принципові дослідження та розробки сконцентровано саме у цьому напрямі. Базові характеристики ЕТЗ визначаються показниками їх електромеханічних систем, які складаються з тягового електроприводу (ЕП), що забезпечує керування рухом транспортного засобу, а також джерела живлення на основі акумуляторних батарей (АКБ). Однак низька ємність акумуляторів, висока вартість і проблеми з утилізацією є обмеженнями для розвитку транспортної галузі. Гібридні джерела живлення (ГДЖ), побудовані на батареях, суперконденсаторах (СК) і реверсивних DC-DC перетворювачах, мають такі переваги перед акумуляторним живленням: вища ефективність обміну енергією, довший термін служби і зменшення втрат в АКБ. Питанням побудови ГДЖ та оптимізації функціонування акумулятора в його базових режимах віддачі енергії, накопичення при рекуперації присвячено значну кількість досліджень.

Найбільш ефективними двигунами є синхронні зі збудженням від постійних магнітів. В частині тягових електроприводів використовуються асинхронні двигуни. Векторне полеорієнтоване керування визначає основну технологію керування в тягових ЕП, яка забезпечує високі динамічні та енергетичні характеристики ЕТЗ.

Аналіз стану досліджень свідчить, що існуюча на сьогодні наукова і технологічна база розробки ЕМС ЕТЗ містить значну кількість невирішених проблем. Саме тому дисертаційна робота Ніконенка Є.О. присвячена вирішенню актуального наукового завдання, яке полягає у покращенні показників якості керування та енергетичної ефективності за рахунок розробки методів аналізу і синтезу алгоритмів керування тяговими електромеханічними системами з гібридними джерелами живлення.

Оцінка обґрунтованості наукових результатів дисертації, їх достовірності та новизни.

Дослідження, що виконані в дисертаційній роботі, базуються на застосуванні фундаментальних положень електротехніки, теорії електричних машин і теорії електроприводу, сучасної теорії автоматичного керування, математичному моделюванні, застосуванні сучасних комп'ютерних програм для чисельного дослідження розроблених математичних моделей, а також проведених фізичних експериментах.

Результати математичного моделювання підтверджено результатами експериментів, отриманими на створеному дослідному стенді. Узгодження цих результатів підтверджує адекватність розроблених математичних моделей та результатів, які були одержані аналітичними методами.

Таким чином, методи дослідження відповідають поставленим задачам і забезпечують достатньо ефективно їх розв'язання та досягнення поставленої в роботі мети. Наведені аргументи дають змогу визнати достовірними наукові результати, основні положення та зроблені висновки досліджень.

Наукова новизна результатів дисертаційного дослідження полягає в наступному:

1. Розвинуто теорію керування DC-DC перетворювачами як нелінійними немінимально-фазовими об'єктами. Запропоновано новий метод синтезу та аналізу, що базується на частковій лінеаризації зворотним зв'язком, а також лінеаризації нелінійних рівнянь динаміки з білінійними властивостями відносно рівняння балансу потужності. Такий результат дозволяє використовувати існуючі методи аналізу стійкості лінійних систем зі змінними параметрами для оптимізації вибору параметрів регуляторів.
2. Доведено асимптотичні властивості композитної системи керування ГДЖ, яка складається зі зв'язаних підсистем регулювання напруги ланки постійного струму, струмів АКБ і СК, завдання для яких формується за допомогою фільтру розділення частот, а також підсистеми регулювання усередненого значення напруги СК. Обґрунтовано, що за рахунок формування розділення у часі процесів у контурах регулювання забезпечується асимптотичне регулювання напруги ланки постійного струму і середньої напруги СК разом з розподілом динамічних складових вхідних струмів.
3. Аналітично розв'язано принципові задачі ідентифікації електричних параметрів АД, СДПМ та DC-DC перетворювачів. За допомогою другого методу Ляпунова, обґрунтовано структуру коригуючих зворотних зв'язків адаптивних спостерігачів та алгоритмів ідентифікації, які гарантують властивості глобальної експоненційної стійкості процесів ідентифікації.

Основні наукові положення за результатами досліджень адекватно відображені у восьми пунктах загальних висновків.

Практичне значення отриманих результатів полягає у створенні науково-технічної платформи розробки та проектування тягових

електромеханічних систем з гібридними джерелами живлення та розробці апаратно-програмних засобів для їх дослідження і практичного застосування. В ході виконання дисертаційної роботи були досягнуті наступні практичні результати:

1. Система керування електромеханічними системами з гібридним джерелом живлення забезпечує зменшення інтегрального середньоквадратичного значення струму АКБ до 4% та його похідної до 93% у порівнянні з акумуляторним живленням та іншими існуючими топологіями ГДЖ в умовах проведених випробувань. Це дозволяє зменшити втрати в акумуляторних батареях та розширити термін їх служби.

2. Методики та рекомендації щодо розрахунку параметрів регуляторів ГДЖ та векторно-керованих електроприводів доступні з інженерної точки зору і дозволяють швидко налаштовувати підсистему керування відповідно до заданих динамічних показників якості.

3. Запропонована концепція експериментальних досліджень електромеханічних систем електричних транспортних засобів з ГДЖ дозволяє проектувати уніфіковані прототипні установки для випробувань широкого спектру алгоритмів керування в умовах, наближених до умов реальних електромобілів.

4. Розроблено експериментальний прототип з програмним забезпеченням для моделювання, експериментальною установкою та програмним забезпеченням для DSP-контролера в комплекті з векторно-керованими АД, СДПМ, акумуляторними батареями, блоком СК, DC-DC перетворювачами та емулятором електродвигуна.

Матеріали дисертаційної роботи застосовуються у навчальному процесі НТУУ «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 та лабораторних заняттях.

Результати роботи у частині керування DC-DC перетворювачами впроваджено в ТОВ «Політехносервіс» (м. Бровари).

Наукові дослідження були виконані здобувачем на кафедрі автоматизації електромеханічних систем та електроприводу КПІ ім. Ігоря Сікорського в рамках 3 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.) під керівництвом д.т.н., проф. Пересади Сергія Михайловича. ← формат рецензії.

Частина досліджень виконувалася протягом 2019-2020 років в лабораторії інформаційних технологій, електротехніки та мехатроніки Університету прикладних наук Міittelхессена (Німеччина), а також 4-х місячного стажування в університеті Ворики (Велика Британія).

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.

Обґрунтовані в дисертації рішення дають змогу застосувати запропоновану дослідницьку платформу для тестування режимів роботи тягових ЕМС з ГДЖ 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 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 «Електромеханічне перетворення та передача енергії».

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, копіїляції, 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 у логічній послідовності; застосований стиль написання є науковим, з врахуванням актуальної міжнародної і вітчизняної термінології.

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

У вступі обґрунтовано доцільність та актуальність роботи, вказано її зв'язок з науковими планами та програмами, визначено мету та задачі

дослідження, сформульовано наукову новизну та практичне значення результатів, а також наведено відомості про апробацію дисертаційної роботи.

У першому розділі виконано аналітичний огляд електромеханічних систем електричних транспортних засобів з різними топологіями джерела живлення, алгоритмів керування і ідентифікації параметрів асинхронних двигунів, синхронних двигунів з постійними магнітами і DC-DC перетворювачів.

У другому розділі розроблено систему ослаблення поля для векторно-керованих асинхронних двигунів, яка дозволяє збільшити максимальне значення розвиненої потужності в умовах обмеження напруги та струму статора. З використанням другого методу Ляпунова теоретично обґрунтовано структуру коригуючих зворотних зв'язків адаптивного спостерігача активного опору ротора АД та алгоритмів ідентифікації параметрів СДПМ.

У третьому розділі розроблено новий метод синтезу і аналізу систем керування DC-DC перетворювачами, які описуються нелінійною немінімально-фазовою моделлю. Запропонований метод базується на частковій лінеаризації зворотним зв'язком, а також лінеаризації нелінійних рівнянь динаміки з білінійними властивостями відносно рівняння балансу потужності. Це дозволяє використовувати існуючі методи аналізу стійкості лінійних систем зі змінними параметрами для оптимізації налаштування параметрів регуляторів. Представлено алгоритм ідентифікації параметрів реверсивних DC-DC перетворювачів, що гарантує властивості глобальної експоненційної стійкості процесу ідентифікації.

У четвертому розділі доведено асимптотичні властивості композитної системи керування ГДЖ, що складається з підсистем регулювання вихідної напруги ГДЖ, струмів АКБ та СК, задані значення для яких формуються з використанням фільтру розділення частот, а також підсистеми регулювання усередненого значення напруги СК. Методика і рекомендації з налаштування регуляторів ГДЖ є доступною з інженерної точки зору і дозволяє швидко налаштовувати підсистему керування відповідно до бажаних показників якості динамічних процесів. Обґрунтовано, що за рахунок формування розділення у часі процесів у контурах регулювання забезпечується асимптотичне регулювання вихідної напруги і середньої напруги СК з розподілом динамічних складових вхідних струмів між АКБ та СК.

У п'ятому розділі дисертації розроблено концепцію експериментальних досліджень електромеханічних систем електричних транспортних засобів з ГДЖ. Вона дозволяє проектувати, розробляти і конфігурувати уніфіковані прототипні установки для випробувань широкого спектру алгоритмів керування в умовах, наближених до умов реальних електромобілів. Розроблено, виготовлено і налагоджено експериментальний прототип з програмним забезпеченням для моделювання, експериментальною установкою та програмним забезпеченням для DSP-контролера в комплекті з векторно-керованими АД, СДПМ, акумуляторними батареями, блоком СК, DC-DC перетворювачами та емулятором двигуна. Доведено, що система керування

електромеханічними системами з ГДЖ забезпечує зменшення інтегрального середньоквадратичного значення струму АКБ до 4% та його похідної до 93% у порівнянні з акумуляторним живленням та іншими існуючими топологіями ГДЖ в умовах проведених випробувань. Це дозволяє зменшити втрати в акумуляторних батареях та розширити термін їх служби.

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

У *додатках* до дисертації наведено класифікацію стратегій керування з коротким описом режимів роботи повністю керованих гібридних джерел живлення електричних транспортних засобів, параметри номінального режиму двигунів, DC-DC перетворювачів і джерел живлення, список публікацій, відомості про апробацію результатів дисертації та впровадження результатів дисертаційної роботи в навчальний процес і практику підприємства.

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 статті 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. В дисертаційній роботі відчувається деяке перевантаження поданим матеріалом, що ускладнює його сприйняття.

2. Повністю керована топологія ГДЖ має найбільшу кількість ступенів свободи в керуванні, в той же час напівкерована структура з DC-DC перетворювачем лише в колі суперконденсаторів виглядає економічно більш привабливою. Чи робилося якесь техніко-економічне порівняння?

3. У дисертації є акт впровадження системи керування DC-DC перетворювачем, в той же час в матеріалах дисертації суть впровадження не розкрито.

4. У роботі проведено експериментальні дослідження DC-DC перетворювачів з вихідною напругою 100 В. Чому було обрано таке значення?

5. У роботі присутні випадки використання англomовної термінології без перекладу, є громіздкі речення.

Зазначені зауваження не є принциповими і такими, що піддають сумніву вагомості результати досліджень. Вони не впливають на загальну 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 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».

Рецензент:

завідувач кафедри
електромеханіки Національного
технічного університету України
«Київський політехнічний інститут
імені Ігоря Сікорського»,

К.Т.Н., доц.



«19» 10 2023 року

