

ВІДГУК

офіційного опонента, кандидата технічних наук, доцента, в.о. завідувача кафедри електротехнічних систем Львівського національного університету ветеринарної медицини та біотехнологій імені С.З. Гжицького ЛЕВОНЮКА Віталія Романовича на дисертаційну роботу КУЗИКА Ростислава-Івана Валерійовича «Синтез енергоформуючого керування електротехнічними комплексами із застосуванням декомпозиції», подану до захисту у разову спеціалізовану вчену раду Національного університету «Львівська політехніка» Міністерства освіти і науки України на здобуття наукового ступеня доктора філософії із галузі знань 14 «Електрична інженерія» за спеціальністю 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»

Актуальність теми дисертації та зв'язок із науковими програмами, темами

У сучасному світі електротехнічні системи стають дедалі складнішими, інтегруючи у собі різні джерела, накопичувачі та споживачі енергії. Зокрема, зростаюча популярність відновлюваних джерел енергії, розвиток електротранспорту та потреба у підвищенні ефективності керування електромеханічними системами вимагають нових підходів до їхнього моделювання та керування.

Однак складність таких систем суттєво ускладнює побудову математичних моделей, а відтак, ускладнює розробку надійних та стійких систем керування. Традиційні методи часто не враховують повною мірою енергетичні процеси у системі, що може призводити до неефективного використання ресурсів, підвищених втрат та нестабільності роботи.

Порт-гамільтонові системи дають змогу описати поведінку таких комплексів через потоки енергії та взаємодію між компонентами. Однак великі розмірності рівнянь і нелінійність таких моделей ускладнюють їхній аналіз та синтез керування. У зв'язку з цим виникає необхідність спрощення моделей через декомпозицію – розбиття складної системи на менші підсистеми, які можна розглядати окремо.

Дисертація присвячена розробці підходів до декомпозиції порт-гамільтонових моделей електротехнічних комплексів, що дає змогу значно спростити процедуру побудови систем керування та підвищити їхню ефективність. Запропоновані підходи є важливими як для академічних досліджень, так і для практичного застосування, зокрема у сфері електроенергетики, електромеханіки та автоматизації.

Представлене у дисертації дослідження безпосередньо стосується актуальних напрямів розвитку електротехнічних систем та відповідає загальнодержавним і міжнародним науково-технічним програмам, спрямованим на підвищення енергоефективності та надійності електроенергетичних комплексів.

Зміст дисертаційної роботи та її основні результати відповідають Закону України «Про пріоритетні напрями розвитку науки і техніки», зокрема п. 6 статті 7 «Новітні технології та ресурсозберігаючі технології в енергетиці, промисловості та агропромисловому комплексі».

Окрім цього, результати дисертаційного дослідження є складовою частиною наукових досліджень, що проводяться кафедрою електромехатроніки та комп'ютеризованих електромеханічних систем Національного університету «Львівська політехніка», зокрема у рамках напрямку «Створення спеціальних мікропроцесорних і комп'ютерних систем керування».

Одержані результати мають не лише теоретичне значення, а й практичне застосування, оскільки розроблені методи можуть бути використані при проектуванні та оптимізації автономних енергосистем, електроприводів транспортних засобів, а також гібридних систем накопичення енергії. Впровадження таких підходів сприятиме підвищенню ефективності роботи електротехнічних комплексів та зниженню енергетичних втрат, що є важливим у контексті глобального переходу до стійких та екологічно безпечних технологій.

Результати дисертаційного дослідження вже використовуються у навчальному процесі при викладанні дисципліни «Методи синтезу та аналізу систем автоматичного керування» для здобувачів другого (магістерського) рівня освіти зі спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка» у Національному університеті «Львівська політехніка». Це підтверджує їхню цінність для підготовки фахівців у галузі сучасних систем автоматичного керування та електротехніки.

Наукова новизна отриманих результатів

Дисертаційне дослідження спрямоване на розв'язання науково-технічної задачі спрощення синтезу систем енергоформуючого керування для складних електротехнічних комплексів шляхом застосування методів декомпозиції порт-гамільтонових систем. Основний внесок роботи полягає у розвитку теоретичних основ керування нелінійними енергетичними системами та створенні нових підходів до моделювання і керування такими системами.

До основних наукових результатів дисертації можна віднести:

1. Розвинено теорію енергоформуючого керування шляхом застосування декомпозиції порт-гамільтонових систем для складних електротехнічних об'єктів, що дає змогу спростити процедуру структурного синтезу систем керування, зберігаючи при цьому фізично обґрунтовану взаємодію підсистем через енергетичні потоки.

2. Запропоновано новий підхід до структурної декомпозиції порт-гамільтонових систем, що дає змогу розбити систему на каскадні, паралельні та комбіновані підсистеми, оптимізуючи синтез систем енергоформуючого керування. Вперше доведено, що така декомпозиція дає змогу суттєво зменшити кількість взаємозв'язків у системі, що спрощує моделювання та керування.

3. Розроблено методику режимної декомпозиції порт-гамільтонових систем, яка дає змогу описати перехідні режими роботи електротехнічних комплексів у вигляді незалежних підсистем. Це особливо важливо для електроприводних систем, де розглянуто режими тяги та рекуперативного гальмування на основі двонапрявленого *DC-DC* перетворювача *Zeta-SEPIC*.

4. Вперше проведено порівняльний аналіз систем енергоформуючого керування для декомпонованих та недекомпонованих систем, який показав, що запропоновані методи дають змогу досягнути практично ідентичної якості керування, але з меншими обчислювальними витратами.

Відтак, отримані результати сприяють подальшому розвитку теорії порт-гамільтонових систем та методів їх застосування у керуванні складними електротехнічними комплексами, забезпечуючи нові можливості для їхньої реалізації у сучасних автономних енергосистемах та електроприводах.

Практична цінність одержаних результатів

Результати дисертаційного дослідження мають суттєве практичне значення, оскільки запропоновані методи структурної та режимної декомпозиції порт-гамільтонових систем дають змогу значно спростити синтез систем енергоформуючого керування, що відкриває нові можливості для їхнього застосування у реальних електротехнічних комплексах.

Основні аспекти практичної цінності роботи:

1. Оптимізація керування автономними енергетичними системами:

- запропоновані методи дають змогу ефективно керувати вітро-сонячними електрогенеруючими комплексами, які мають гібридні системи накопичення енергії (акумуляторно-суперконденсаторні модулі);

- удосконалена стратегія енергетичного менеджменту сприяє підвищенню ефективності використання енергії, що є особливо важливим для автономних систем живлення.

2. Покращання ефективності електроприводних систем:

- запропоновані методи режимної декомпозиції дають змогу покращити керування електроприводами транспортних засобів, які працюють у різних режимах (тяга, рекуперативне гальмування);

- досліджено та реалізовано систему енергоформуючого керування електропривода із двонапрямленим *Zeta-SEPIC DC-DC* перетворювачем, що дає змогу мінімізувати втрати енергії та забезпечити стабільну роботу у змінних умовах навантаження.

3. Зниження складності реалізації систем автоматичного керування:

- застосування методів декомпозиції дає змогу понизити порядок математичних моделей, що суттєво спрощує обчислення та налаштування систем керування (це особливо корисно при реалізації керування на мікроконтролерах та вбудованих системах, де обчислювальні ресурси обмежені).

Відтак, практична цінність роботи полягає у можливості реального впровадження запропонованих методів в автономні енергетичні комплекси, електроприводи та системи автоматичного керування, що забезпечує ефективне, енергоощадне та надійне функціонування сучасних електротехнічних систем.

Ступінь обґрунтованості наукових положень, висновків і рекомендацій

Наукові положення, висновки та рекомендації, сформульовані у дисертаційній роботі, мають високий рівень обґрунтованості та підтверджені як теоретичними, так й експериментальними дослідженнями.

1. Теоретичне обґрунтування:

- у дисертації використано порт-гамільтоновий формалізм, який є загально визнаним та широко застосовується у моделюванні нелінійних енергетичних систем;

- запропоновані методи структурної та режимної декомпозиції базуються на фундаментальних підходах до розкладу складних систем на підсистеми, що підтверджує їхню математичну коректність;

- використано методи теорії автоматичного керування, включаючи методи введення додаткових взаємозв'язків та демпфувань (*IDA-PBC*), що є сучасним напрямом у синтезі керування нелінійними системами.

2. Комп'ютерне моделювання:

- здійснені розрахунки та симуляційні дослідження у комп'ютерному середовищі *Matlab/Simulink* дали змогу оцінити ефективність розроблених підходів та підтвердили їхню працездатність у різних режимах роботи;

- виконано порівняльний аналіз роботи системи енергоефективного керування загального електротехнічного комплексу та для декомпонованих підсистем, який продемонстрував еквівалентну якість керування при суттєвому зниженні обчислювальної складності.

3. Експериментальна перевірка

- отримані теоретичні результати були верифіковані експериментальними дослідженнями на лабораторному стенді, який включає двонапрявлений *Zeta-SEPIC DC-DC* перетворювач та електроприводну систему;

- здійснені експерименти підтвердили, що застосування режимної декомпозиції дає змогу ефективно керувати електроприводом у тяговому та рекуперативному режимах;

- виміряні характеристики електричних та механічних параметрів збігаються із результатами комп'ютерного моделювання, що свідчить про правильність побудови математичної моделі.

Наукові положення, висновки та рекомендації, сформульовані у дисертації, є обґрунтованими, достовірними і підтвердженими комплексом аналітичних, числових, комп'ютерних та експериментальних методів дослідження.

Відсутність (наявність) порушення академічної доброчесності

Аналіз змісту дисертаційної роботи, публікацій автора та використаних джерел свідчить про відповідність дослідження принципам академічної доброчесності. Дисертація містить результати авторських досліджень, які підтверджуються відповідними науковими публікаціями та апробацією матеріалів на конференціях. Усі використані у роботі наукові ідеї, методи та підходи мають відповідні посилання на першоджерела, що свідчить про дотримання норм цитування та відсутність плагіату.

У тексті дисертації наявні посилання на відповідні джерела при використанні ідей інших дослідників, що відповідає вимогам академічної доброчесності. Бібліографічний список містить широке охоплення сучасної наукової літератури, включаючи статті у фахових журналах та матеріали конференцій.

Дисертаційне дослідження виконане відповідно до вимог академічної доброчесності, а отримані результати є самостійними, оригінальними та коректно оформленими. Відсутні факти порушення наукової етики, а наявні посилання на використані джерела забезпечують прозорість та достовірність наукової роботи.

Повнота викладу результатів дисертації в опублікованих працях

Результати дисертаційного дослідження знайшли повне відображення у наукових публікаціях здобувача, що підтверджує відповідність роботи вимогам до дисертацій на здобуття ступеня доктора філософії.

Основні результати дисертації опубліковано у 9 наукових працях, серед яких: 1 стаття у міжнародному рецензованому журналі, який індексується наукометрично базою *Scopus*; 3 статті у фахових наукових виданнях України, які відповідають вимогам до дисертаційних робіт; 5 публікацій у матеріалах міжнародних та всеукраїнських конференцій, з яких 1 проіндексована у наукометричній базі *Scopus*.

Опубліковані статті та тези конференцій чітко відображають основні наукові результати дисертації. Результати дослідження були представлені на авторитетних міжнародних наукових конференціях, що забезпечило їх обговорення у широкій науковій спільноті.

Викладення наукових результатів у публікаціях є повним та відповідає змісту дисертації. Кількість і рівень публікацій засвідчують належну апробацію дослідження, а їх відповідність спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка» підтверджує завершеність та наукову значущість роботи.

Дискусійні питання та зауваження щодо змісту дисертації

Окремі аспекти роботи потребують уточнення або можуть бути предметом подальших наукових досліджень:

1. Огляд літератури у дисертації містить аналіз основних підходів до синтезу систем енергоформування керування та методів декомпозиції, однак розгляд внеску попередників у цій галузі виглядає дещо поверхневим, зокрема, варто звернути увагу на такі аспекти як аналіз фундаментальних робіт у галузі порт гамільтонових систем та розвиток теорії керування порт-гамільтоновими системами.

2. У світовій науковій літературі вже є значна кількість досліджень, присвячених пасивному керуванню (*Passivity-Based Control, PBC*) та методам введення додаткових зв'язків і демпфувань (*IDA-PBC*). Однак у дисертації немає чіткої систематизації попередніх результатів, що могло б показати, як саме запропоновані автором методи відрізняються від існуючих.

3. Було б доцільно доповнити аналіз чутливості керування до параметричних збурень, особливо для випадків реальних електротехнічних комплексів, де значення параметрів можуть змінюватися у процесі роботи.

4. Незважаючи на здійснене моделювання у *Matlab/Simulink*, не подано аналізу часових характеристик перехідних процесів при зміні режимів роботи (перехід між *Zeta* і *SEPIC* режимами). Варто оцінити, чи не виникають затримки чи осциляції під час перемикання між режимами тяги та рекуперативного гальмування.

5. У дисертації представлено експериментальні дослідження на макетному зразку електропривода із *Zeta-SEPIC DC-DC* перетворювачем. Проте масштабність отриманих результатів на повномасштабні реальні системи залишається відкритим питанням. Було б доцільно розглянути, які обмеження накладає лабораторна установка на валідність отриманих висновків для великих електротехнічних комплексів.

Наведені зауваження не знижують загальної цінності дисертаційної роботи, а радше окреслюють напрями для подальших досліджень у цій перспективній галузі.

Загальний висновок щодо дисертації в цілому

Дисертаційна робота Кузика Ростислава-Івана Валерійовича на тему «Синтез енергоформуючого керування електротехнічними комплексами із застосуванням декомпозиції» є завершеним, самостійним і цілісним науковим дослідженням, що містить важливі теоретичні та практичні результати у сфері керування складними електротехнічними системами.

Наукова новизна дисертації підтверджується розробкою нових методів декомпозиції, що дають змогу поділяти складні електротехнічні комплекси на підсистеми з меншим порядком, зберігаючи при цьому їхню фізичну взаємодію. Практична цінність роботи підтверджується застосовністю отриманих результатів для оптимізації керування автономними електрогенеруючими комплексами та електроприводами транспортних засобів.

Дисертація відповідає вимогам академічної доброчесності, усі використані матеріали коректно процитовані, а результати є самостійними. Наукові результати роботи опубліковані у міжнародних та фахових наукових виданнях, що засвідчує їхню апробацію та відповідність сучасним науковим тенденціям у галузі електричної інженерії.

Відтак, опираючись на актуальність теми дисертації, обґрунтованість наукових положень та висновків, їх новизну та практичну цінність, вважаю, що дисертація відповідає вимогам «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 року №44, а її автор, Кузик Ростислав-Іван Валерійович заслуговує на присудження наукового ступеня доктора філософії у галузі знань 14 «Електрична інженерія» за спеціальністю 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка».

Офіційний опонент:

в.о. завідувача кафедри
електротехнічних систем
Львівського національного
університету ветеринарної медицини
та біотехнологій імені С. З. Гжицького,
кандидат технічних наук, доцент



Віталій ЛЕВОНЮК

Підпис кандидата технічних наук, доцента Віталія Левонюка засвідчую.

Учений секретар Львівського національного
університету ветеринарної медицини
та біотехнологій імені С. З. Гжицького,
кандидат економічних наук, доцент

Наталія СТОЙКО