

ВІДГУК

*офіційного опонента про дисертаційну роботу
Білецького Юрія Олеговича
на тему "Розвиток методів синтезу нелінійних електротехнічних систем на
енергетичній основі", подану на здобуття наукового ступеня доктора
технічних наук за спеціальністю 05.09.03 – електротехнічні комплекси та
системи*

Актуальність теми

Сучасні електротехнічні системи (ЕТС) є мультифізичними комплексами що поєднують у собі процеси різної природи та потребують застосування сучасних методів керування, які б забезпечували підвищення показників якості керування та показників енергетичної ефективності. Це зумовлює зростання вимог до деталізації моделей об'єктів електричної інженерії та пошук нових методів синтезу алгоритмів керування. Одним з перспективних шляхів до вирішення таких задач є використання енергетичних підходів, які зокрема широко застосовуються вченими в закордонних дослідницьких центрах. Застосування енергетичних підходів дозволяє зберегти в математичному описі фізичну сутність процесів в електротехнічних комплексах та системах, а також забезпечити підвищення показників їх енергетичної ефективності.

Тому дисертаційна робота Білецького Юрія Олеговича, що присвячена розвитку теорії методів синтезу нелінійних електротехнічних систем на енергетичній основі, а також поставлені в ній мета та задачі є актуальними. Дисертаційна робота виконана у відповідності до розробленого згідно із Законом України від 24 червня 2014 р. "Про пріоритетні напрямки розвитку науки та техніки" наукового напрямку Інституту енергетики та систем керування Національного університету "Львівська політехніка" "Ресурсозберігаючі технології та інтелектуальні системи керування в енергозабезпеченні об'єктів економічної діяльності" та внесеними змінами від 12 січня 2024 р. "Енергетика та енергоефективність".

Наукова новизна результатів дослідження

Автором отримано нові наукові результати, зокрема:

– уперше розроблено метод параметричного синтезу лінійних та нелінійних систем енергоформуючого керування, оптимальних за заданим критерієм якості, шляхом формування взаємозв'язків і демпфування в рівнянні Ріккати;

– уперше запропоновано метод математичного моделювання на енергетичній основі складних систем, який полягає у поєднанні методів енергетичного макропредставлення та енергоформуючого керування, що дає змогу підвищити точність математичного моделювання довготривалих динамічних процесів у електротехнічних комплексах з об'єктами різної природи;

– уперше отримано у вигляді множин універсальних лінійних перетворювачів потужності математичні моделі низки електротехнічних систем: векторно керована синхронна машина з постійними магнітами з врахуванням втрат в сталі, вітроустановка з синхронним генератором, відцентрова помпа з електроприводом, що дало змогу аналізувати ефективність енергоперетворення в цих системах.

– уперше запропоновано для аналізу та синтезу нелінійних SISO систем поєднати енергетичні підходи – метод енергоформуючого керування для синтезу їх роботи в динамічних режимах та метод лінійної нерівноважної термодинаміки для енергетичної оптимізації їх роботи в усталених режимах, що дає змогу підвищити якісні динамічні та енергетичні показники таких систем.

– уперше запропоновано імпульсний спосіб роботи сонячної автономної водопомпової установки прямого привода із введенням в канал перетворення енергії проміжного суперконденсаторного накопичувача електричної енергії, який додатково виконує функцію пошуку точки максимальної потужності сонячних фотоелектричних панелей, що дає змогу забезпечити pompвання води з максимальною енергетичною ефективністю.

– набув подальшого розвитку метод структурного синтезу нелінійних систем керування шляхом формування взаємозв'язків та демпфування в напрямку введення додаткових керуючих впливів на непрямоконтрольовані координати, що дає змогу розширити регульовальні можливості енергоформуючого керування та реалізовувати необхідні стратегії керування.

– набув подальшого розвитку метод опису закономірностей роботи лінійних перетворювачів потужності на основі залежностей лінійної нерівноважної термодинаміки щодо його поширення на нелінійні об'єкти у вигляді множини лінійних перетворювачів потужності.

Ступінь обґрунтованості, достовірності та новизни наукових положень

Обґрунтованість і достовірність основних результатів дисертації Білецького Ю.О. зумовлена коректністю постановки завдань, вірно обраними методами їх

вирішення, порівнянням одержаних результатів із результатами, опублікованими в наукових працях авторів провідних видань, а також з результатами експериментів. У дисертаційній роботі застосовано фундаментальні методи теоретичного аналізу, що спираються на усталені положення теорії керування, варіаційного числення та термодинаміки. Ці методологічні підходи є класичними, детально розробленими та широко апробованими в науковій літературі. Достовірність основних теоретичних положень і сформульованих висновків підтверджено методом математичного моделювання, результати яких узгоджуються з даними натурних випробувань із задовільною збіжністю. Отримані результати є всебічними, детальними та відповідають теоретичним прогнозам. Можливість їх практичного застосування додатково засвідчується формулюванням конкретних висновків, методик і алгоритмів, що вже впроваджені або можуть бути впроваджені в реальних електротехнічних системах.

Оцінка змісту та завершеності дисертації

Дисертаційна робота Білецького Ю.О. складається зі вступу, п'яти розділів, висновків по роботі, списку літературних джерел та додатків.

У **вступі** автором обґрунтовано актуальність теми дисертації, сформульовано основну мету та задачі роботи, що розв'язувалися для її досягнення, показано наукове і практичне значення отриманих результатів, приведені наукова новизна, зв'язок з науковими програмами, планами та виконаними держбюджетними темами, надано інформацію про апробацію результатів досліджень, впровадження та наукові публікації за темою дисертаційних досліджень.

У **першому розділі** проведено аналіз літературних джерел в напрямку аналізу енергетичних підходів до синтезу систем керування, зокрема нелінійними електротехнічними системами.

Висвітлено основні виклики що постають перед системами керування ЕТС, наведено існуючі методологічні підходи до їх вирішення. Особливу увагу зосереджено на сучасних енергетичних підходах до синтезу керувань, зокрема на методі пасивного керування шляхом формування взаємозв'язків та демпфування, що ґрунтується на моделі об'єкта у гамільтоновому представленні. Розглянуто та детально проаналізовано принципи лінійної термодинаміки нерівноважних процесів у контексті можливості використання її для оптимізації

ефективності функціонування електротехнічних систем. Проведено критичний огляд підходів до моделювання ЕТС, зокрема – енергетичного макропредставлення, визначено їхні переваги та обмеження щодо застосування для моделювання нелінійних динамічних процесів. Узагальнення результатів аналізу дало змогу виявити ключові недоліки існуючих підходів, зокрема фрагментарність методів та відсутність єдиної методології для комплексного синтезу, аналізу та моделювання систем керування. Показано, що новими і перспективними підходами для синтезу систем керування нелінійними електротехнічними системами є енергетичні підходи, які базуються на фізичних законах передачі та перетворення енергії.

У **другому розділі** запропоновано способи розширення структурно-параметричного синтезу систем енергоформуючого керування ЕТС.

Здійснено порівняльний аналіз методів розширення структури енергоформуючого керування системами в гамільтоновій формі. Розроблено та обґрунтовано процедури розширення синтезу систем енергоформуючого керування, що забезпечують використання впливів, які не реалізовувалися раніше. На основі теорії оптимального керування розроблено методи параметричного синтезу енергоформуючого керування, що дають змогу отримати оптимальні, згідно з заданими критеріями, параметри матриць демпфування та взаємозв'язків між підсистемами, застосовні як для лінійних, так і для нелінійних електротехнічних систем. Можливість практичної реалізації запропонованих підходів параметричного синтезу підтверджено результатами математичного моделювання та натурним експериментом. Дослідження проводилися на прикладах двомасової механічної системи, а також електроприводу на базі синхронного двигуна з постійними магнітами.

У **третьому розділі** дисертації сформовано та досліджено метод оптимізації електротехнічних систем з використанням засобів лінійної термодинаміки нерівноважних процесів.

Виконано математичне моделювання синхронних машин з постійними магнітами з розміщенням магнітів на поверхні та всередині ротора, як універсальних перетворювачів потужності. Запропоновано процедуру адаптації засобів лінійної термодинаміки нерівноважних процесів до нелінійних електротехнічних систем. Досліджено характеристики одержаних моделей та способи оптимізації їх роботи з метою підвищення вихідної потужності машин. Моделі розроблено для режимів роботи на швидкостях нижче та вище

номінальної. Підведено підсумки та сформовано рекомендації щодо підвищення ефективності експлуатації машин, складено карти для стратегій керування.

Розроблено моделі та досліджено характеристики перетворювачів потужності таких об'єктів як вітротурбіна та синхронний генератор з постійними магнітами. Виконано моделювання та дослідження вітрогенеруючої установки, як каскадного перетворювача з урахуванням особливостей з'єднання її елементів. Проведено дослідження з метою оптимізації цих систем і підвищення їх результуючої ефективності.

Розроблено методику математичного моделювання водопомпової установки. Розроблено математичну модель водопомпової установки з гідравлічною системою як перетворювача потужності, та досліджено можливості для підвищення її продуктивності та оптимізації роботи. Також розглянуто можливості поєднання енергоформуючих пасивних систем з лінійною термодинамікою нерівноважних процесів для підвищення ефективності.

У **четвертому розділі** дисертації досліджено можливості застосування розроблених методів та підходів до синтезу систем керування різними об'єктами.

Розроблені в роботі методи застосовано до: розробки системи двозонного регулювання швидкістю електропривода на базі двигуна постійного струму незалежного збудження; синтезу енергоформуючого керування гібридними системами нагромадження енергії з автономними сонячними енергоустановками. Для системи нагромадження енергії додатково розроблено та досліджено можливі регулятори енергоформуючого керування та виявлено можливі взаємовпливи між підсистемами. Дослідження проводилися для активної та напівактивної конфігурацій системи накопичення. Для обох конфігурацій розроблено відповідні стратегії енергетичного менеджменту. Окрім комп'ютерних досліджень, для підтвердження одержаних результатів, наведено результати натурного експерименту що з достатньою збіжністю співпадають з результатами математичного моделювання.

Запропоновано нову систему керування гібридними системами нагромадження енергії для транспортних засобів, з каскадним DC-DC перетворювачем. Розроблено систему енергоформуючого керування DC-DC перетворювача для швидкого регулювання вихідної напруги згідно запропонованої методики та порівняно з існуючими в літературі енергетичними підходами.

Запропоновано помпувальну установку що живитися від фотоелектричної панелі з енергоформуєчим керуванням. Розроблено методику розрахунку її елементів. Запропоновано та проведено порівняльні дослідження помпувальних установок прямого приводу, зокрема з використанням суперконденсатора як проміжного буфера енергії.

У п'ятому розділі енергетичне макропредставлення розширене та поєднане з іншими енергетичними підходами.

Запропоновано розширену систему енергоформуєчого керування електроприводом на базі синхронної машини з постійними магнітами в енергетичному макропредставленні. Електромагнітна частина машини розглядається як нероздільна з нелінійною зв'язаною динамікою. Запропоновану систему досліджено для випадків розміщення постійних магнітів як на поверхні, так і в середині ротора.

Розроблено модель приводу коліс передньопривідного електромобіля у енергетичному макропредставленні та запропоновано систему керування нею.

Розроблено та досліджено роботу системи енергоформуєчого керування для електроприводу транспортного засобу на базі синхронної машини з постійними магнітами з використанням запропонованого комплексного енергетичного підходу що поєднує гамільтоновий формалізм, енергетичне макропредставлення, енергоформуєче керування та оптимізацію засобами лінійної термодинаміки нерівноважних процесів з подальшим формуванням стратегії керування.

Висновки до дисертаційної роботи містять дванадцять пунктів, які повністю висвітлюють отримані у роботі наукові результати.

У додатках наведено перелік публікацій автора за темою дисертації, програми, додаткові результати розрахунків і досліджень, акти впровадження та використання результатів роботи.

Дисертація та автореферат написані українською мовою. Стиль викладу матеріалів відповідає загальноприйнятому і має високий науково-професійний рівень. Оформлення дисертації та автореферату відповідає чинним вимогам.

Виходячи з аналізу основної частини дисертаційної роботи, можна зробити висновок що дисертація є завершеною науковою кваліфікаційною роботою.

Значення одержаних результатів для науки і практики та рекомендації щодо їх можливого використання.

Одержані в дисертаційному дослідженні результати мають теоретичну та практичну цінність і можуть бути використані для подальших теоретичних та експериментальних досліджень, а також розроблення нових електротехнічних систем. Запропонований підхід для синтезу, аналізу та моделювання дає змогу розробляти нові системи, а також оптимізувати існуючі. Запропонований автором комплексний підхід до аналізу та синтезу керувань ЕТС дає основу для подальшого розвитку енергетичних підходів. Наведені методи, алгоритми та рекомендації щодо їх застосування є достатньо готовими до використання на виробництві при розробленні нових електротехнічних комплексів та систем. Рішення, запропоновані автором у роботі, можуть знайти застосування у проєктних і конструкторських бюро, науково-дослідних інститутах, підприємствах електротехнічного та електроенергетичного профілю, які спеціалізуються на розробці нових рішень та техніки, інститутах підвищення кваліфікації, перепідготовки інженерно-технічних кадрів та у закладах вищої освіти.

Результати дисертаційної роботи були використані під час роботи над держбюджетними науково-дослідними тематиками “Теоретичне обґрунтування та експериментальне дослідження ефективності роботи котельних установок в процесі довготривалої експлуатації” (2015-2016 рр., держреєстрація №0115U000439) та “Розвиток модульного інтегрованого підходу до конфігурування та керування бортових систем електроприводу та електричного живлення автономних транспортних засобів” (2020–2023 рр., №0120U102206), а також грантами Національного університету «Львівська політехніка» для молодих вчених «Тихохідні горизонтально-осьові вітроустановки з лопатями вітрильного типу для автономних споживачів малої потужності» (2016 р., держреєстрація №0116U008626) та NATO SPS MYP G5176 “Agile Tyre Mobility for Severe Terrain Environment”, відповідно до наказу №2244-3-10. Отримані результати використовуються у науково-дослідних роботах НДЛ «СКБ електромеханічних систем» кафедри електромехатроніки та комп’ютеризованих електромеханічних систем (ЕКС) Національного університету “Львівська політехніка”, у виготовленні підсистем транспортних засобів ТОВ «ДІА-Н», у системах керування енергогенеруючими об’єктами ТОВ «ЛЕОЕНЕРДЖІ»,

електротехнічним устаткуванням ТОВ «РЕД ТЕГ ІНК» і ТОВ «КАРПАТНАФТОХІМ», що підтверджено відповідними актами впровадження.

Повнота викладення результатів роботи в опублікованих працях.

Докторантом Білецьким Ю.О. опубліковано за темою дисертації 33 наукових праці, зокрема: 1 монографія; 1 розділ колективної монографії, що індексується наукометричною базою Scopus; 13 статей опубліковано у виданнях, що входять до переліку фахових видань України; 5 статей у закордонних виданнях, що індексуються міжнародною наукометричною базою Scopus (квартилів Q1 та Q2); 7 у збірниках матеріалів і тез доповідей міжнародних конференцій. Результати дисертаційної роботи в достатній мірі висвітлено в опублікованих наукових працях.

Відповідність реферату та дисертації.

Реферат повною мірою відображає основні положення, висновки і рекомендації, наведені у дисертації. Зміст реферату відповідає змісту дисертації. За структурою, обсягом і оформленням дисертація і реферат відповідають вимогам, що ставляться до дисертацій на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук.

Зауваження до дисертації

Поряд з позитивними сторонами дисертації, необхідно відмітити і низку її недоліків:

1. Актуальність роботи сформульовано нечітко, немає конкретизації проблеми, на вирішення якої спрямовано дисертаційну роботу. В меті роботи було б доцільно додати на що спрямований «...розвиток методів, що використовуються для аналізу та синтезу та моделювання ...», чи це покращення енергетики, показників якості, тощо.

2. Одна з задач звучить як: «Розробити спосіб параметричного синтезу ФКВ для оптимальної СЕФК нелінійними об'єктами, що дасть змогу отримувати системи з бажаними показниками якості перехідних процесів». Разом з тим не зрозуміло, в чому полягає розроблений спосіб, які саме і яким чином бажані показники якості використовуються в запропонованому способі параметричного синтезу. Додатково необхідно відзначити, що «спосіб параметричного синтезу ФКВ» не знайшов відображення у висновках.

3. Рівняння алгоритму керування (2.21) містить компоненту $r2 \frac{\omega - \omega_0}{C} sL_a$, що по суті є диференціюванням сигналу похибки регулювання швидкості. Це викликає сумнів в можливості практичного застосування такого регулятора в реальній системі.

4. По всій роботі формування заданого моменту формується на основі інформації про момент навантаження, тому потребує пояснення можливість практичного застосування розроблених методів з точки зору отримання інформації про реальний момент навантаження двигуна.

5. Не зрозуміло, чому в підрозділі 2.3 моделювання (рис. 2.14) і експеримент (рис. 2.16) виконувалися для різних двигунів. З представлених перехідних процесів складно зробити якісь висновки, а в тексті дисертації їх змістовний аналіз також відсутній. Тому ефективність розроблених в розділі методів потребує додаткового розкриття.

6. Викликає питання необхідність розрахунку активного опору статора та індуктивності статорної обмотки за формулами (3.58) і (3.60), так як ці дані надаються виробником електричної машини.

7. «Покращення одержаних результатів» на рис. 4.2 потребує пояснення, де і в чому саме воно відбулося, бо якщо говорити про час перехідного процесу, то деякі графіки швидкості в другій зоні на рис. 4.2 вказують на погіршення. Також доцільно порівняти отримані результати з випадком застосування традиційної системи підпорядкованого керування.

8. Автор по всій дисертації називає статор синхронної машини якорем, що є дещо застарілим, оскільки якорем традиційно називають внутрішню рухома частину двигуна постійного струму, в той час як синхронна машина складається зі статора і ротора.

9. Результати роботи мають досить широке впровадження, проте в дисертації відсутня інформація про отриманий або потенційно можливий економічний ефект від результатів впровадження розроблених методів.

10. По тексту дисертації є досить багато граматичних помилок та неточностей, наприклад: хибні посилання на формулу (2.7) на стор. 90, формулу (3.54) на стор. 160, п.5.1.2 на стор.92 не існує, неповний підпис. Рис. 2.16, посилання на формули рис.4.14, 4.15 та інші. В деяких випадках для одних і тих же змінних використано різні позначення (наприклад p , p_p для позначення кількості пар полюсів; R , R_s ; i_{d0} та i_{q0} взагалі мають різні тлумачення в розділах 2

і 3, та інші), що ускладнює розуміння матеріалу дисертації. Як у роботі так і в авторефераті аббревіатури розшифровуються по декілька разів.

Вказані зауваження не знижують загальної високої оцінки дисертаційної роботи.

Висновок

Дисертаційна робота Білецького Юрія Олеговича «Розвиток методів синтезу нелінійних електротехнічних систем на енергетичній основі» є завершеним науковим дослідженням, в якому вирішена актуальна науково-технічна проблема формування комплексного підходу до синтезу керування нелінійними електротехнічними системами на енергетичній основі. Вважаю, що за актуальністю, науково-технічною новизною, практичним значенням отриманих результатів та їх реалізацією у нових технічних розробках та висвітленням у наукових виданнях дисертаційна робота відповідає чинним вимогам п. 7-9 Порядку присудження та позбавлення наукового ступеня доктора наук, затвердженого постановою Кабінету Міністрів України від 17 листопада 2021 року № 1197, а її автор Білецький Юрій Олегович заслуговує на присудження йому наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.09.03 – електротехнічні комплекси та системи.

Офіційний опонент,
завідувач кафедри автоматизації електромеханічних
систем та електроприводу Національного технічного
університету України «Київський політехнічний
інститут імені Ігоря Сікорського»

доктор технічних наук, доцент

Сергій КОВБАСА

Підпис доц. Ковбаси С.М. засвідчую.

Вчений секретар
Національного технічного університету України
«Київський політехнічний інститут
імені Ігоря Сікорського»

к. т. н., доцент



Валерія ХОЛЯВКО