

ВІДГУК

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

Актуальність теми

Електротехнічні системи займають чільне місце в реалізації різноманітних технологічних процесів. При цьому зростає їх складність та розширюються задачі, що ставляться перед ними. В багатьох випадках системи утворюють мультифізичні комплекси з підсистемами та нелінійними законами керування. На такі комплекси накладають додаткові енергетичні вимоги, наприклад, щодо їх автономності, енергоефективності та адаптивності. Нелінійність і мультифізичність таких систем ускладнюють їх моделювання та синтез керуючих впливів, що потребує нових методів аналізу.

Перспективним рішенням щодо синтезу систем керування у вказаних випадках є застосування енергетичних підходів, зокрема порт-гамільтонового формалізму та методу введення взаємозв'язків і демпфування, який надає можливості для забезпечення стійкого функціонування нелінійних систем. Такий підхід дозволяє одночасно розглядати процеси та системи різної природи і формувати комплексну систему керування, що враховуватиме особливості усіх підсистем.

Існуючі методи, такі як Bond Graph та Energetic Macroscopic Representation (EMR), сприяють мультифізичному моделюванню, але прийняті припущення при їх розробленні знижують точність та збіжність розрахункових результатів для складних електротехнічних систем. Відсутність універсальних підходів до структурного та параметричного синтезу енергоформуючого керування стримує його широке застосування на практиці.

Дисертаційна робота Білецького Ю.О. присвячена розробці методів математичного моделювання нелінійних електротехнічних систем у вигляді порт-Гамільтонових складових, синтезу систем енергоефективного керування із забезпечення заданої динаміки в перехідних режимах роботи, удосконаленню комп'ютерного симулювання за методом EMR.

Дисертаційна робота виконана у відповідності до тематики наукового напрямку досліджень Інституту енергетики та систем керування Національного університету «Львівська політехніка», зокрема, держбюджетної науково-дослідної тематики «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 гранту 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 гранту NATO SPS MYP G5176 “Agile Tyre Mobility for Severe Terrain Environment”.

Актуальність теми дисертаційної роботи Білецького Ю.О., засвідчують також публікації результатів досліджень в періодичних наукових виданнях, індексованих в наукометричній базі Скопус (квартилі Q1, Q2).

Наукова новизна результатів дослідження

У результаті дисертаційного дослідження автором отримано нові наукові результати, а саме:

- вперше розроблено метод параметричного синтезу лінійних та нелінійних систем енергоформуючого керування, оптимальних за заданим критерієм якості, шляхом формування взаємозв'язків і демпфування в рівнянні Ріккати, що дає змогу отримати систему з бажаними показниками якості перехідних процесів;

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

- вперше отримано 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) у вигляді множин універсальних лінійних перетворювачів потужності, що дало змогу аналізувати ефективність енергоперетворення в цих системах та отримати оптимальні з енергетичної точки зору координати усталених режимів їх роботи;

- вперше запропоновано та апробовано для аналізу нелінійних електротехнічних систем поєднання методу енергоформуючого керування та методу лінійної нерівноважної термодинаміки для енергетичної оптимізації усталених режимів роботи;

- вперше запропоновано імпульсний режим роботи сонячної електричної автономної водопомпової установки прямого привода завдяки введенню в канал перетворення енергії проміжного суперконденсаторного нагромаджувача електричної енергії, що дає змогу забезпечити помпування води з максимальною енергетичною ефективністю незалежно від інтенсивності сонячної радіації;

- набув подальшого розвитку метод структурного синтезу нелінійних систем керування шляхом формування взаємозв'язків та демпфування додаткових керуючих впливів на непрямоконтрольовані координати, що дає змогу розширити регулювальні можливості енергоформуючого керування та реалізовувати необхідні стратегії керування;

– набув подальшого розвитку на основі положень нерівноважної термодинаміки метод універсального математичного опису в безрозмірних одиницях режимів роботи нелінійного перетворювача потужності як множини лінійних.

Ступінь обґрунтованості, достовірності та новизни наукових положень

Обґрунтованість наукових положень і висновків роботи підтверджується коректністю постановки завдань, правильно обраними методами їх вирішення, повір'янням одержаних результатів із результатами, опублікованими в наукових працях авторів провідних видань.

Основні методи теоретичних досліджень, що застосовувалися в дисертаційній роботі, мають за основу наукові положення базових понять теорії керування, варіаційного числення та термодинаміки і являють собою фундаментальні напрямки, що широко апробовані та достатньо висвітлені в літературі. Достовірність основних теоретичних положень і висновків підтверджена численними комп'ютерними дослідженнями та задовільною збіжністю з результатами натурних експериментів. Отримані результати є повними і детальними та узгоджуються з теоретичними очікуваннями.

Достовірність отриманих результатів дисертації також підтверджується доведенням їх до конкретних висновків, методів та алгоритмів, які можуть бути використані або вже використовуються в існуючих електротехнічних комплексах.

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 одні з основних викликів, що постають перед електротехнічними системами та системами керування ними, та наведено існуючі методологічні підходи до їх вирішення. Особливу увагу зосереджено на сучасних енергетичних підходах до синтезу керування, зокрема на методі пасивного керування шляхом формування взаємозв'язків та демпфування, що ґрунтується 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 графічного макропредставлення систем, щодо його застосування для моделювання нелінійних динамічних процесів. За результатами аналізу чинних результатів визначено основні напрямки досліджень дисертаційної роботи.

У другому розділі запропоновано способи розширення структурно-параметричного синтезу системи енергоформуючого керування електротехнічними системами.

Здійснено порівняльний аналіз методів розширення структури енергоформуючого керування системами в гамільтоновій формі. Розроблено та обґрунтовано процедури розширення синтезу систем енергоформуючого керування, що забезпечують використання керуючих впливів, які раніше не могли бути реалізованими. Запропоновано нові підходи для декомпозиції систем та реалізації більш дієвих стратегій керування.

На основі теорії оптимального керування розроблено методи параметричного синтезу енергоформуючого керування, що дають змогу отримати оптимальні, згідно із заданими критеріями, параметри матриць демпфування та взаємозв'язків між підсистемами, застосовні як для лінійних, так і для нелінійних електротехнічних систем. Ефективність запропонованих підходів підтверджено результатами комп'ютерного моделювання та натурним експериментом. Дослідження проводилися на прикладах двомасової електромеханічної 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, що розміщені на поверхні та всередині ротора, як універсальних перетворювачів потужності. Запропоновано процедуру адаптації засобів лінійної термодинаміки нерівноважних процесів до нелінійних електротехнічних систем шляхом множинної лінеаризації. Досліджено характеристики одержаних моделей та способи оптимізації їх роботи з метою підвищення вихідної потужності машин. Моделі було розроблено для режимів їх роботи на швидкостях як нижчих, так і вищих від номінальної. Підведено підсумки і рекомендації щодо підвищення ефективності експлуатації машин та отримано карти енергетичної ефективності, які використовуються для формування енергоефективних стратегій керування.

Аналогічним чином розроблено моделі та досліджено характеристики таких об'єктів як вітротурбіна, що приводить в рух синхронний генератор з постійними магнітами. Виконано моделювання та дослідження вітрогенеруючої установки як каскадного перетворювача потужності з урахуванням особливостей з'єднання її елементів. Проведено дослідження з метою

оптимізації цих систем і підвищення їх результативної енергетичної ефективності, зокрема шляхом покращення зв'язування між ними.

Розроблено методику математичного моделювання водопомпової установки, що живиться від фотоелектричних панелей. 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 систем пасивного керування 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 на основі енергетичних підходів.

Застосовано запропонований підхід структурного синтезу до системи двозонного регулювання швидкістю електропривода на базі двигуна постійного струму незалежного збудження. Розроблено два способи реалізації керування потоком збудження машини, що дають змогу забезпечити високі динамічні та статичні показники системи.

Застосовано запропонований підхід до синтезу енергоформуючого керування гібридними акумуляторно-суперконденсаторними системами накопичення енергії в автономних сонячних енергоустановках. Розроблено та досліджено можливі регулятори енергоформуючого керування та виявлено можливі взаємовпливи між підсистемами. Дослідження проводилися для активної та напівактивної конфігурацій гібридної системи накопичення. Для обох конфігурацій були розроблені відповідні стратегії енергетичного менеджменту. Окрім комп'ютерних досліджень наведено також результати натурного експерименту, що мають достатню збіжність з відповідними результатами симулювання.

Розроблену комп'ютерну програму автоматизованого синтезу було використано для одержання структур системи енергоформуючого керування гібридними системами накопичення енергії для електричних транспортних засобів. Дану систему було доповнено функцією обмеження струму. Запропоновано також нову систему, з каскадним DC-DC перетворювачем, яка має суттєві переваги у керуванні та налаштуванні порівняно з існуючими на сьогодні. До кожної системи було розроблено відповідну систему енергетичного менеджменту.

Розроблено робастну систему енергоформуючого керування неідеальним підвищувальним DC-DC перетворювачем для швидкодіючого регулювання вихідної напруги згідно запропонованої методики та порівняно її роботу з низкою інших наведених в літературі підходів.

Запропоновано енергоформуюче керуванням водопомпувальною установкою, що працює від фотобатареї. Розроблено методику розрахунку її елементів. Запропоновано та проведено порівняльні дослідження водопомпувальних установок прямого приводу, зокрема з використанням

суперконденсаторного проміжного буфера енергії. Дієвість такої системи підтверджено натурним експериментом.

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

Запропоновано розширену систему енергоформуючого керування електроприводом на базі синхронної машини з постійними магнітами в енергетичному макропредставленні. Електромагнітна частина машини розглядається як нероздільна з нелінійною зв'язаною динамікою. Запропонована система досліджувалась для випадків розміщення постійних магнітів як на поверхні, так і в середині ротора, з застосуванням відповідних стратегій керування.

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

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

Робота завершується висновками, які впливають зі змісту роботи та є логічними.

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

Отримані в дисертаційному дослідженні результати характеризуються теоретичною та практичною значимістю. Вони можуть бути використані для подальшого теоретичного та експериментального дослідження, а також розроблення нових електротехнічних систем. Запропонований комплексний апарат для синтезу, аналізу та моделювання є водночас практичним інструментом для розроблення нових систем, модернізації існуючих, а також платформою для подальшого розвитку енергетичних підходів для синтезу складних нелінійних систем мультифізичної природи. Систематизований і структурований практичний матеріал дає змогу надавати інженеру науково-обґрунтований набір алгоритмів та структур систем керування для досліджуваних у роботі електротехнічних комплексів. Рішення, запропоновані автором у роботі, можуть знайти застосування у проектних і конструкторських бюро, науково-дослідних інститутах, підприємствах, які спеціалізуються на розробці нових рішень та техніки, інститутах підвищення кваліфікації, перепідготовки інженерно-технічних кадрів та особливо у закладах вищої освіти. Основні результати дисертаційної роботи використано і впроваджено підприємствами регіону з метою підвищення ефективності електротехнічних

систем транспортних засобів, електрогенеруючих комплексів, помпувальних установок, що підтверджується відповідними актами впровадження результатів дисертаційних досліджень.

Повнота викладення в опублікованих працях отриманих у роботі результатів

Здобувачем за темою дисертації опубліковано 33 наукових праці, у тому числі: 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 статей у збірниках матеріалів міжнародних конференцій, які в достатній мірі висвітлюють результати роботи, що виносяться на захист.

Відповідність реферату та дисертації

Ознайомлення з рефератом дає підстави стверджувати, що за структурою та змістом реферат відповідає вимогам, що ставляться МОН України до рефератів дисертаційних робіт. У тексті реферату відображено основні положення, зміст, результати і висновки здійсненого здобувачем дисертаційного дослідження. Зміст реферату та основних положень дисертації є ідентичними.

Зауваження щодо змісту та оформлення дисертаційної роботи

1. У назві дисертації задекларовано "Розвиток методів синтезу нелінійних електротехнічних систем на енергетичній основі". Але структура та склад електротехнічних систем визначаються відповідно до задач реалізації конкретної технології. Так, зокрема, технологічна схема перетворення кінетичної енергії вітрового потоку в електричну енергію може складатися з вітротурбіни, генератора, системи акумулювання, напівпровідникових перетворювачів параметрів електричної енергії. Необхідні лише раціональні методи аналізу режимів функціонування системи з мультифізичними процесами її складових частин для вибору параметрів технічного рішення. Проте забезпечення максимальної енергоефективності технології потребує створення системи керування, що охоплює всі складові з різними регульовальними властивостями, тобто потребує синтезу як відповідних законів керування, так і відповідних виконавчих елементів. В представленому дослідженні розглядаються методи синтезу систем енергоефективного керування нелінійними електротехнічними системами.

2. При формуванні вихідних положень порт-Гамільтонового моделювання мультифізичних процесів в дисертації (стор. 27) та рефераті (стор. 2) наявна прикра неточність: "Привабливість енергетичного підходу до математичного моделювання роботи багатфізичних систем зумовила розроблення низки методів, зорієнтованих на комп'ютерне симулювання, серед яких виділяються

такі як вже старіший Bond Graf та новий метод EMR (Energetic Macroscopic Representation). Спільним у цих методах є портовий підхід до моделювання, коли кожен порт, якими з'єднуються елементи модельованої системи, описується двома змінними – СИЛОЮ та ПОТОКОМ, ДОБУТОК ЯКИХ РІВНИЙ ПОТУЖНОСТІ, а зв'язок між підсистемами здійснюється за принципом «акція – реакція»." Так як суть Гамільтонового перетворення Лагранжіана узагальнених сил та координат переміщень системи полягає в заміні диференційних рівнянь другого порядку відносно координат на еквівалентні диференційні рівняння першого порядку відносно тих самих координат, то змінними величинами для кожного порту будуть узагальнена сила та перша похідна координати переміщення, тобто швидкість "реакції на акцію". Тому потужність кожного порту буде дорівнювати добутку узагальненої сили на швидкість узагальненого переміщення. Зокрема, для гідравлічних систем потужність дорівнюватиме добутку тиску на швидкість потоку (витрати рідини), для обертового руху - добуток обертового моменту на кутову швидкість, для поступального руху - добуток сили на швидкість, для електричних систем - добуток напруги на швидкість руху зарядів (струм). Доцільно зазначити, що в подальшому процесі дослідження узагальнені координати використовувались правильно.

3. В пункті 2.3.2 розроблено метод параметричного синтезу енергоефективного керування двомасовою системою зі сталим значенням коефіцієнта жорсткості гнучкого вала та лінійною залежністю кута скручування від моменту. Використовувалось порт-Гамільтонове моделювання складових. Дослідження ефективності методу здійснено шляхом порівняння поведінки системи з випадком оптимального керування. Проте необхідно зазначити, що не для всіх видів двомасових систем мають місце зазначені припущення. Багато потужних приводів двомасових систем характеризуються наявністю нелінійних властивостей гнучких (пружних) елементів трансмісії із-за обмежувачів руху. Тому сфера застосування даного способу керування для інших систем потребує проведення додаткових досліджень.

4. В третьому розділі роботи при синтезі оптимальних координат роботи синхронної машини з постійними магнітами на основі положень лінійної термодинаміки нерівноважних процесів використовується запозичена з закордонної публікації функціональна залежність втрат в сталі від частоти обертання (3.11). Відповідно до (3.11) зі зниженням кутової швидкості обертання еквівалентне значення опору втрат в сталі машини також зменшується. Ця залежність використовується для отримання кількісних оцінок нерівноважності при аналізі енергетичних показників усталених генераторних та моторних навантажувальних режимів роботи синхронної машини.

Проте для аналізу синхронної машини згідно її заступної схеми, наведеної на рис.3.1 та параметрів машини наведених в табл.3.1, правомірність застосування даної залежності є дискусійною.

Так як для досліджуваної машини $R \ll R_c$, то відповідно до заступної електричної схеми в осі d еквівалентний опір втрат потужності в сталі може бути визначено наближено як $R_c \approx (v_d)^2 / (P_r(\omega, B) + P_b(\omega^2, B^2))$; де P_r, P_b -

втрати потужності на гістерезис та вихрові струми для конкретної марки та товщини електротехнічної сталі, В - індукція.

Аналогічна залежність має місце і для осі q . В обох випадках еквівалентне значення опору втрат потужності за сталого значення v зменшується зі збільшенням частоти обертання, що не співпадає з (3.11). Інші варіанти мабуть можливі, якщо формувати регульовальний вплив напруги в функції частоти обертання $v(\omega)$. Так як інформація про реалізацію даного закону керування відсутня, то явних підстав для використання залежності (3.11) немає.

5. Зауваження до оформлення роботи.

Викладення матеріалу загалом чітке та стилістично виважене.

В багатьох місцях текст дисертації та реферату характеризується засиллям аббревіатури, що ускладнює сприйняття змісту навіть з наявним поряд переліком скорочень.

Так як розроблено нові методи, то у тексті дисертації та висновках доцільно було б більш детально конкретизувати інформацію стосовно їх точності, стійкості, збіжності.

Зазначені зауваження мають переважно дискусійний, або рекомендаційний характер та не впливають на загальну позитивну оцінку роботи.

Висновок

Дисертаційна робота Білецького Ю.О. «Розвиток методів синтезу нелінійних електротехнічних систем на енергетичній основі», в якій комплексно розв'язана наукова проблема математичного моделювання електротехнічних систем на енергетичній основі, структурного і параметричного синтезу динамічних систем керування, енергетичної оптимізації роботи цих систем в ustalених режимах, є закінченим науковим дослідженням, містить нові теоретичні і практичні результати та відповідає 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 відділу гідроенергетики
Інституту відновлюваної енергетики НАН України,
доктор технічних наук, професор

 Петро ВАСЬКО

Підпис професора Васька П.Ф. засвідчую.

Вчений секретар Інституту
відновлюваної енергетики НАН України,
доктор технічних наук, с.н.с.

 Таміла СУРЖИК

