

ВІДГУК

**офіційного опонента на дисертаційну роботу
Білецького Юрія Олеговича "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 дисертаційної роботи.

Серед систем, якими послуговується людина, одними з найпоширеніших є електротехнічні системи (ЕТС), адже саме електрична енергія вирізняється високою керованістю та може з високою ефективністю перетворюватися в інший вид енергії. Проте стрімке зростання енергоспоживання, необхідність раціонального використання енергетичних ресурсів, інтеграція відновлюваних джерел енергії та розвиток «розумних» енергетичних систем вимагають нових підходів до керування ЕТС. Традиційні методи моделювання та синтезу систем керування, що базуються на класичних принципах автоматичного керування, виявляють низку обмежень при застосуванні до складних, нелінійних систем із високими вимогами до стійкості, ефективності та адаптивності.

Для подолання цих обмежень використовуються підходи лінеаризації, адаптивні, інтелектуальні системи керування, а також останнім часом підходи на енергетичній основі. Останні вигідно вирізняються оскільки використовують універсальне поняття енергії як для аналізу систем, так і для синтезу систем керування ними. Саме використання універсальних енергетичних закономірностей дає змогу безпосередньо зв'язати системи різної природи, виконати їх моделювання, а також виявити приховані сили взаємодії з ними, що суттєво розширює можливості керування. Яскравим прикладом є вітрова турбіна, в якій поєднуються аеродинамічні, механічні та електричні процеси. Одним із перспективних енергетичних напрямів є поєднання математичного моделювання системи як гамільтонової системи з керованими портами та пасивного керування шляхом формування взаємозв'язків між підсистемами та демпфування. Однак, попри чіткість процедури структурного синтезу, робастність, асимптотичну стійкість, модульність та можливості декомпозиції, врахування фізичних обмежень системи, ілюстровані перетоки енергії та можливість керувати ними, дане поєднання має низку критичних недоліків. Не всі знайдені структури регуляторів такої системи керування можуть бути реалізовані, а ті що можуть – забезпечують подібне або навіть гірше керування, ніж інші відомі підходи. Окрім проблем структурного синтезу, для таких систем відсутні ефективні методи параметричного синтезу, зокрема для випадків складних та нелінійних систем. Тому дисертаційна робота Білецького Ю.О., спрямована на розвиток теорії, методів синтезу нелінійних електротехнічних систем на енергетичній основі, є актуальною науковою працею.

Метою дисертаційної роботи є розвиток теорії синтезу, аналізу та моделювання систем автоматизованого керування електротехнічними системами

на основі енергетичних підходів шляхом удосконалення існуючих методів, застосування нових підходів, а також поєднання їх між собою.

Задачі досліджень у дисертації обумовлені поставленою метою роботи і полягають у розробленні концепції енергетичного підходу, що поєднує моделювання, аналіз та структурно-параметричний синтез систем автоматизованого керування.

Серед задач, поставлених у дисертаційній роботі, є розроблення способу отримання усіх можливих структур регуляторів енергоформуючої системи керування, способу параметричного синтезу оптимальної енергоформуючої системи керування, методу аналізу з енергетичної точки зору усталених режимів роботи нелінійних систем та розширення енергетичного макропредставлення електротехнічних систем як гамільтонових з керованими портами.

Отримані теоретичні результати у вигляді розроблених систем та закономірностей керування перевірялися шляхом математичного моделювання та комп'ютерного симулювання.

Окремою важливою задачею досліджень було створення програмних засобів для автоматизації структурного синтезу, а також проведення експериментальних досліджень для підтвердження одержаних результатів.

Весь предмет досліджень розподілений на окремі задачі, які становлять розділи дисертації теоретичного і практичного характеру.

Відповідно до мети і завдань у роботі визначені об'єкт і предмет досліджень, які належать до переліку напрямів науково-дослідних робіт за паспортом спеціальності 05.09.03 – електротехнічні комплекси та системи.

Оцінка змісту дисертаційної роботи.

Дисертаційна робота Білецького Ю.О. складається зі вступу, п'яти розділів, висновків до розділів, загальних висновків, списку літературних джерел (479 найменувань) та 7 додатків. Загальний обсяг роботи становить 417 стор., у тому числі 295 стор. основного тексту, 110 рисунків та 12 таблиць.

За обсягом та текстовим і графічним матеріалом дисертація відповідає вимогам, що встановлені до докторських дисертацій з технічних наук.

У **вступі** обґрунтовано актуальність теми, сформульовано мету, завдання досліджень, наукову новизну і практичну цінність роботи, наведено відомості про апробацію і публікації основних результатів дисертації.

У **першому** розділі проведено аналіз літературних джерел, які висвітлюють проблеми синтезу та аналізу систем керування сучасними електротехнічними комплексами, а також існуючі підходи їх вирішення. Виконано аналіз новітніх енергетичних підходів до синтезу систем керування, зокрема керування шляхом формування взаємозв'язків та демпфування. Детально розглянуто підходи лінійної термодинаміки нерівноважних процесів, зокрема для оптимізації ефективності роботи систем. Наведено та глибоко проаналізовано метод моделювання на основі енергетичного макропредставлення. Таким чином, у першому розділі проведено аналіз сучасного стану всіх завдань, які поставлено у

дисертаційній роботі. Зроблено загальні висновки про недоліки існуючих підходів та відсутність загального підходу до синтезу, аналізу та моделювання.

У **другому** розділі проведено порівняльні дослідження способів розширення структурного синтезу енергоформуючого керування систем як гамільтонових з керованими портами. Автором запропоновано процедури синтезу систем енергоформуючого керування, які уможливають передачу керуючих впливів на бажані координати стану через контрольовані контури системи і суттєво розширюють регульовальні можливості керування. Одержані системи мають кращі статичні та динамічні характеристики в порівнянні з синтезованими за відомими підходами.

Запропоновано нові підходи до параметричного синтезу енергоформуючого керування, що дає змогу одержати оптимальні, за заданим критерієм, елементи матриць демпфування та взаємозв'язків між підсистемами енергоформуючого керування як для лінійних, так і для нелінійних електротехнічних систем. Ефективність запропонованих методів синтезу оптимального керування підтверджено результатами комп'ютерного симулювання, а також експериментальними дослідженнями. Ілюстративними прикладами були двомасова електромеханічна система та синхронний двигун з постійними магнітами.

Третій розділ дисертації присвячено формуванню концепції оптимізації електротехнічних систем на основі апарату лінійної термодинаміки нерівноважних процесів.

На основі математичної моделі синхронної машини з постійними магнітами та врахуванням втрат в сталі розроблено її моделі як лінійного перетворювача потужності (для варіантів машини IPMSM та SPMSM). Досліджено способи оптимізації її роботи, з точки зору максимізації перетворення потужності або вихідної потужності, шляхами зміни конструктивних особливостей та регулювання. Дослідження виконані для випадків кутової швидкості машини нижче та вище номінальної. Для другої зони регулювання кутової швидкості IPMSM знайдені значення складової струму якоря i_d , які забезпечують роботу машини на кривій обмеження за напругою якоря.

На основі математичних моделей вітротурбіни та синхронного генератора з постійними магнітами розроблено її моделі як лінійних перетворювачів потужності, а також розроблено їх сукупну модель як каскадного перетворювача потужності. Досліджено способи оптимізації їх роботи та накреслено шляхи щодо підвищення ефективності всього комплексу, зокрема з урахуванням впливу з'єднання між підсистемами.

На основі лінійної термодинаміки нерівноважних процесів розроблена методика математичного моделювання роботи водопомпової установки як універсального перетворювача потужності, що працює в заданій гідравлічній системі. Проведено дослідження з метою підвищення енергетичної ефективності роботи помпи в системі її живлення від фотоелектричної установки та наведено рекомендації для конструювання таких систем, що дають змогу збільшити річну водяну продуктивність.

Розглянуто можливості поєднання енергоформуючих пасивних систем та апарату лінійної термодинаміки нерівноважних процесів.

Четвертий розділ дисертації присвячено апробації запропонованих методів та синтезу систем керування електротехнічними об'єктами на основі енергетичних підходів.

Запропоновано два способи синтезу двозонної системи керування швидкістю двигуна постійного струму, що дають змогу отримати високі динамічні та статичні показники системи.

Розроблено системи енергоформуючого керування гібридними акумуляторно-суперконденсаторними системами нагромадження електроенергії для автономних сонячних енергоустановок з різними регуляторами для випадків активної та напівактивної конфігурацій. Проведено порівняльні комп'ютерні дослідження регуляторів, а також реалізовано систему енергетичного менеджменту. Результати підтверджені експериментальними дослідженнями.

Розроблено та досліджено системи енергоформуючого керування гібридними системами нагромадження енергії для транспортних засобів, зокрема активної з функцією обмеження струму, а також запропонованої нової – з каскадним DC-DC перетворювачем, та відповідними системами енергетичного менеджменту.

Синтезовано та досліджено енергоформуючу систему керування DC-DC перетворювача для швидкого регулювання вихідної напруги.

Запропоновано сонячну установку помпування води з акумуляторною системою накопичення та енергоформуючим керуванням, а також розроблено методику розрахунку її елементів. Розроблено та досліджено низку сонячних установок помпування води прямого приводу різних конфігурацій, зокрема з використанням проміжного суперконденсаторного модуля, що мають суттєво більшу продуктивність порівняно з сучасними аналогами. Отримані теоретичні результати підтверджено експериментальними дослідженнями.

У **п'ятому** розділі розвинуто спосіб енергетичного макропредставлення та поєднано його з енергоформуючим керуванням та результатами оптимізації на основі лінійної термодинаміки нерівноважних процесів.

Запропоновано систему енергоформуючого керування електроприводом на базі синхронної машини з постійними магнітами в енергетичному макропредставленні, де електромагнітна частина є підсистемою з багатьма входами з нелінійною зв'язаною динамікою. Проведено порівняльні дослідження для варіацій SPMSM та IPMSM. Розроблено систему керування колесами передньопривідного електромобіля на основі геометрії Ackermann-Jeantaud в енергетичному макропредставленні. Розроблено та досліджено роботу системи енергоформуючого керування електропривода електричного транспортного засобу в енергетичному макропредставленні зі стратегією на основі лінійної термодинаміки нерівноважних процесів.

Загальні висновки щодо дисертаційної роботи повністю висвітлюють одержані наукові результати, а також включають особливості використання розроблених методів і моделей. Запропоновані в дисертаційній роботі енергетичні підходи дають змогу одержати системи, що переважають існуючі за

динамічними та статичними показниками, а також регулювальними можливостями та процедурою налаштування.

У додатках наведено список публікацій автора за темою дисертації та висвітлено особистий внесок у них здобувача, показано приклад програми автоматизованого структурного синтезу системи енергоформуючого керування, розрахунок параметрів досліджуваних систем, детальні дослідження структур розроблених регуляторів гібридних систем накопичення енергії, апаратне та програмне розроблення сонячних водопомпувальних установок, а також 6 актів впровадження та використання результатів дисертаційної роботи.

Обґрунтованість та достовірність результатів, висновків та рекомендацій.

Основні положення дисертаційної роботи Білецького Ю.О. узгоджуються із сучасними джерелами інформації про теоретичні закономірності, проблеми і підходи до побудови систем керування сучасними електротехнічними системами на основі енергетичних підходів, які сьогодні у світовій практиці вважаються одними з найбільш перспективних для складних, нелінійних об'єктів, що поєднують в собі підсистеми різної природи.

Дисертаційну роботу за своєю логічною структурою можна умовно розділити на чотири частини: 1) структурно-параметричний синтез динамічної системи – розширення процедури структурного синтезу енергоформуючого керування шляхом формування взаємозв'язків та демпфування в напрямку дії на непрямо контрольовані контури, розроблення програми для їх автоматизації, а також розроблення процедури параметричного синтезу системи оптимального енергоформуючого керування; 2) формування усталених режимів – математичне моделювання на основі лінійної динаміки термодинамічних процесів різних електротехнічних систем, їх оптимізація щодо максимізації перетворення потужності та енергії, а також поєднання з енергоформуючими динамічними системами; 3) моделювання систем – моделювання відповідно до енергетичного макропредставлення та його поєднання з енергоформуючим керуванням; 4) приклади застосування – енергоформуюче керування двозонним електроприводом постійного струму, гібридними енергоустановками, сонячними водопомповими установками та ін.

Обґрунтованість і достовірність основних результатів дисертації зумовлена застосуванням теоретичних засад фізики, електротехніки, теорії електроприводу, теорії автоматичного керування, коректністю вихідних передумов під час математичного моделювання електротехнічних систем, чіткістю процедур синтезу та аналізу систем керування ними, а також експериментальними дослідженнями, результати яких узгоджуються з відповідними результатами комп'ютерного симулювання.

Наукова новизна отриманих результатів.

1. 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.

2. Вперше запропоновано 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.

3. Вперше отримано математичні моделі 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.

4. Вперше 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.

5. 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.

6. Набув подальшого розвитку метод універсального опису в безрозмірних одиницях закономірностей роботи лінійних перетворювачів потужності на основі залежностей лінійної нерівноважної термодинаміки щодо його поширення на нелінійні об'єкти у вигляді множини лінійних перетворювачів потужності.

Практичне значення одержаних результатів.

Поєднання розвинених в роботі методів аналізу, синтезу та моделювання на енергетичній основі вже використовується автором і його колегами та може бути використано у подальших дослідженнях і розробках реальних ЕТС. Зокрема, можна виділити такі позитивні сторони цих методів.

Отримані в дисертаційній роботі результати є важливими для сучасних підходів до аналізу, синтезу та моделювання ЕТС, зокрема складних, нелінійних, які поєднують підсистеми різної природи. Запропонований метод синтезу системи керування дає змогу отримати оптимальну стійку систему енергоформуючого керування з широкими регульовальними можливостями та визначеною стратегією керування. Розроблена програма автоматизованого синтезу суттєво прискорює процедуру знаходження дієвих структур регуляторів енергоформуючого керування та їх налаштування. Оптимізація усталених режимів нелінійних об'єктів на основі термодинаміки нерівноважних процесів забезпечує енергоефективність стратегії керування, що є особливо корисно з врахуванням глобальних тенденцій підвищення енергоефективності.

Запропонований підхід до аналізу SISO систем зі складною нелінійною динамікою на основі лінійної термодинаміки нерівноважних процесів дає змогу оцінити енергетичну якість систем, а також синтезувати оптимальні з енергетичної точки зору координати їх роботи в усталених режимах, що слугуватимуть частиною стратегії керування. Все це вже використано у розробках систем на базі синхронних машин з постійними магнітами, відцентрової помпи, сонце- та вітрогенеруючих систем. Удосконалений метод EMR уможливило комп'ютерне симулювання з високою точністю роботи на тривалих проміжках часу, що необхідно для аналізу ефективності роботи ЕТС з тривалими циклами роботи, наприклад, систем відновлюваної енергетики та електромобілів.

Отримані структури регуляторів активної та напівактивної акумуляторно-суперконденсаторної гібридних систем нагромадження енергії забезпечують виконання стратегії енергетичного менеджменту та можуть бути використані в системах з відповідними модулями. Розроблена система керування приводами коліс на основі електронного диференціала та інверсного керування забезпечує високу точність формування крутного моменту та швидкості на кожному з коліс, повороти електромобіля без ковзання коліс, безпеку руху та зносостійкість шин, що є актуальним під час розробки систем електричних транспортних засобів.

Отримані результати використовуються у науково-дослідних роботах НДЛ «СКБ електромеханічних систем» кафедри електромехатроніки та комп'ютеризованих електромеханічних систем Національного університету «Львівська політехніка», а також у навчальному процесі для студентів спеціальності 141 – „Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка” у начальних дисциплінах «Електрообладнання і системи керування електромобілів» та «Математичне моделювання елементів та систем повних і гібридних електромобілів та міського електротранспорту», «Методи синтезу та аналізу САК», «Спецкурс з наукових досліджень спеціальності, частина 1».

Результати роботи впроваджено: при виготовленні підсистем транспортних засобів ТОВ «ДІА-Н» (м. Львів); у системах керування енергогенеруючими об'єктами ТОВ «ЛЕОЕНЕРДЖІ» (м. Львів); у системах керування електротехнічними системами ТОВ «РЕД ТЕГ ІНК» (м. Львів); у системах керування електротехнічними системами ТОВ «КАРПАТНАФТОХІМ» (м. Калуш).

Апробація результатів роботи підтверджується тим, що основні положення і результати роботи доповідались на міжнародних науково-технічних і науково-практичних конференціях різного рівня.

Повнота викладення результатів досліджень в опублікованих працях. Результати дисертації знайшли повне відображення у 33 наукових працях автора, у тому числі: 1 монографія, 1 розділ колективної монографії, що індексується наукометричною базою Scopus, 5 статей у закордонних періодичних виданнях, що індексуються наукометричною базою Scopus (Q1, Q2); 13 статей у наукових фахових виданнях України; 7 матеріалів міжнародних конференцій, що

індексуються наукометричною базою Scopus. Обсяг, кількість і джерела публікацій відповідають діючим вимогам до докторських дисертацій.

Відповідність змісту автореферату основним положенням дисертації.

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

Використання у докторській дисертації результатів наукових досліджень захищеної кандидатської дисертації.

Результати та публікації наукових досліджень, за якими здобувач захистив кандидатську дисертацію у 2014 р. на тему «Енергоформуюче керування електромеханічними системами на базі синхронної машини з постійними магнітами», не входять у докторську дисертацію.

Відповідність змісту дисертації встановленим вимогам. Зміст дисертації Білецького Ю.О. відповідає спеціальності 05.09.03 – електротехнічні комплекси та системи.

Зауваження по дисертаційній роботі.

1) До наукової новизни не відноситься спосіб, методика, алгоритм. Тому п.5 наукової новизни «Запропоновано імпульсний спосіб роботи сонячної автономної установки...» недоцільно вносити у наукову новизну отриманих результатів.

2) У дисертації не в повній мірі описані припущення при розробленні комп'ютерних і математичних моделей.

3) Не в повній мірі виконана кількісна оцінка отриманих результатів. При порівнянні результатів математичного моделювання і фізичного експерименту автор вказує на добру узгодженість (рис. 2.16), добре сходження (рис. 4.7 і 4.8), тощо.

4) Не завжди зрозуміло, яким чином було вибрано параметри, що використовувались при математичному моделюванні (наприклад, параметри в табл. 4.3, тощо).

5) Використовуються не зовсім вдалі порівняння: «незначно покращати», «високі статичні і динамічні характеристики» (у висновках розділу 2), тощо.

6) Деякі із висновків по розділам і всієї дисертації подано як перелік зробленого: розділ 2 – п.2 і 4; висновки по дисертації – п. 10.

7) Деякі матеріали дисертації доцільно було винести до оглядової частини дисертації (у розділ 1 відомі математичні моделі з розділу 2) або у додатки (таблиці параметрів).

8) У переліку умовних скорочень відсутні скорочення, які використовуються у розділах дисертації (IPMSM, SPMSM, МТРА тощо).

9) Мають місце орфографічні помилки і неточності.

Вказані зауваження не впливають на загальну позитивну оцінку виконаної роботи.

Висновок

Дисертація Білецького Юрія Олеговича є закінченою роботою, спрямованою на вирішення важливої науково-технічної проблеми створення комплексного підходу до моделювання, синтезу та аналізу складних, нелінійних електротехнічних систем з підсистемами різної природи на основі енергетичних підходів. У виконаній роботі отримано нові важливі науково-прикладні результати теоретичного і практичного планів, які підтверджено відповідними експериментами. Дисертаційні дослідження здобувача виконані на сучасному методологічному і науковому рівні, ґрунтуються на базових положеннях теорії керування, електротехніки, електромеханіки та електроніки.

Вважаю, що за актуальністю, науковою новизною, практичним значенням отриманих результатів та їх реалізацією у нових технічних розробках, висвітленням у наукових виданнях дисертаційна робота відповідає чинним вимогам, які ставляться до робіт на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук, 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 присудження йому наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.09.03 – електротехнічні комплекси та системи.

Офіційний опонент,
завідувач відділу електромеханічних систем
Інституту електродинаміки НАН України

доктор технічних наук, професор

Леонід МАЗУРЕНКО



Олегович Т.
Сла-