МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ "ЛЬВІВСЬКА ПОЛІТЕХНІКА"

БІЛЕЦЬКИЙ Юрій Олегович

УДК 620.9:621.3:681.5

РОЗВИТОК МЕТОДІВ СИНТЕЗУ НЕЛІНІЙНИХ ЕЛЕКТРОТЕХНІЧНИХ СИСТЕМ НА ЕНЕРГЕТИЧНІЙ ОСНОВІ

Спеціальність 05.09.03 – електротехнічні комплекси та системи

РЕФЕРАТ дисертації на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук

ЛЬВІВ – 2025

Дисертацією є рукопис

Робота виконана в Національному університеті "Львівська політехніка"

Науковий консультант:	доктор технічних наук, професор Щур Ігор Зенонович, завідувач кафедри електромехатроніки та комп'ютеризованих електромеханічних систем Національного університету "Львівська політехніка"
Офіційні опоненти:	доктор технічних наук, професор Мазуренко Леонід Іванович, завідувач відділу електромеханічних систем Інституту електродинаміки НАН України
	доктор технічних наук, професор Васько Петро Федосійович, завідувач відділу гідроенергетики Інституту відновлюваної енергетики НАН України
	доктор технічних наук, доцент Ковбаса Сергій Миколайович, завідувач кафедри автоматизації електромеханічних систем та електроприводу Національного технічного університету України «Київський політехнічний інсти- тут імені Ігоря Сікорського»

Захист відбудеться « 09 » *травня* 2025 року о 12 годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д35.052.02 у Національному університеті "Львівська політехніка" (79013, м. Львів-13, вул. С. Бандери, 12, ауд. 226 гол. корпусу).

З дисертацією можна ознайомитися в бібліотеці Національного університету "Львівська політехніка" (м. Львів, вул. Професорська, 1).

Вчений секретар спеціалізованої вченої ради, к.т.н., доцент

Василь КОРУД

Актуальність теми. Стрімкий розвиток електротехнічних систем (ЕТС) та постійне ускладнення задач, що вони виконують, зумовили пошук нових методів розроблення нелінійних мультифізичних систем, зокрема методів аналізу, синтезу та моделювання на енергетичній основі. Для цього вже існуючі в аналітичній механіці підходи до математичного моделювання механічних систем було поширено на системи будь-якої фізичної природи, зокрема моделювання у формі ейлер-лагранжевих та гамільтонових систем. З метою подальшого синтезу систем автоматичного керування, за останні роки значно розвинувся саме гамільтоновий формалізм математичного моделювання нелінійних динамічних систем як порт-гамільтонових систем (ПГС) та метод керування ними шляхом взаємозв'язків та демпфування (Interconnection введення and Damping Assignment Passivity-Based Control – IDA-PBC). Це зумовлено такими перевагами ПГС: придатність для моделювання широкого класу пасивних систем; фізична інтерпретація як реальних портів (входів та виходів) системи, так і зрозумілість енергетичних процесів, що мають місце в них; чіткість математичного опису; розроблення низки методів керування, що забезпечують асимптотичну стійкість ПГС. Попри фізичну зрозумілість методу IDA-PBC та різноманітність варіантів введення взаємозв'язків і демпфування, все ще залишається досить складною та без ефективного вирішення проблема структурного і параметричного синтезу систем енергоформуючого керування (СЕФК). Для вирішення цієї проблеми необхідно розробити нові підходи до синтезу СЕФК, в тому числі з поєднанням їх з іншими методами керування.

Оскільки в усталених режимах переважна більшість систем працює тривалий час, то забезпечення енергетичної ефективності такої роботи є важливим завданням. Специфіка математичного опису об'єктів, в тому числі й ЕТС, як ПГС в просторі змінних стану, кількість яких рівна кількості елементів системи, в яких нагромаджується енергія, зумовлює доцільність розроблення стратегії енергетичного менеджменту (СЕМ), яка й реалізується СЕФК. У СЕМ задаються значення змінних стану в усталеному режимі системи, в якому повна енергія системи (Гамільтоніан) набуває свого мінімуму, забезпечуючи тим самим асимптотичну стійкість, в загальному, нелінійної ПГС. Саме формування завдання для СЕМ під час синтезу СЕФК доцільно поєднати з розв'язанням оптимізаційної задачі пошуку координат системи з максимальною енергетичною ефективністю. У випадку мультифізичних систем розв'язання таких задач ускладняється фізичною специфікою підсистем, що входять до загальної системи. Як вихід з цієї ситуації пропонується математичне моделювання та подальшу енергетичну оптимізацію усталених режимів мультифізичних систем теж здійснювати на енергетичній основі. Перспективним теоретичним фундаментом такого моделювання може бути лінійна термодинаміка нерівноважних процесів (ТДНП) з її універсальним феноменологічним підходом.

Привабливість енергетичного підходу до математичного моделювання роботи мультифізичних систем зумовила розроблення низки методів, зорієнтованих на комп'ютерне симулювання, серед яких виділяються такі, як вже ста-

ріший 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». Перевагами методу EMR є його орієнтація на робоче середовище Simulink пакету Matlab та проста і універсальна реалізація системи керування за принципом інверсного керування. Проте моделі керованих мультифізичних систем, розроблені за методом EMR, занадто простими, забезпечує високу бувають ЩО швидкодію часто комп'ютерного симулювання, але при цьому втрачається як точність моделювання, так і якість роботи системи керування. Пропонується розвиток методу EMR у напрямку моделювання його підсистем як ПГС з відповідними синтезованими СЕФК та розробленими СЕМ, які опираються на результати енергетичної оптимізації усталених режимів роботи підсистем на основі лінійної ТДНП. Все це органічно поєднує на енергетичній основі математичне моделювання складних нелінійних ЕТС, синтез СЕФК їх роботою в динамічних режимах та енергетичну оптимізацію координат роботи в усталених режимах, і дає змогу розробляти складні мультифізичні нелінійні системи.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дослідження проводились відповідно 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". Основні результати дисертаційної роботи були використані у процесі виконання держбюджетних науково-дослідних робіт "Теоретичне обґрунтування та експериментальне дослідження ефективності роботи котельних установок в експлуатації" довготривалої (2015-2016 держреєстрація процесі pp., №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 грантах 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.

Мета роботи і завдання дослідження. Метою дисертаційної роботи є розвиток методів, що використовуються для аналізу, синтезу та моделювання нелінійних електротехнічних систем, в напрямку застосування підходів, які базуються на енергетичних закономірностях роботи цих систем.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити наступні завдання:

– Провести аналіз останніх літературних джерел щодо застосування енергетичних підходів до математичного опису систем, їх моделювання та побудови систем керування. – Розробити спосіб отримання можливих структур формувачів керуючих впливів (ФКВ) для конкретного об'єкта, що моделюється як ПГС, з метою синтезу ефективної СЕФК.

– Розробити спосіб параметричного синтезу ФКВ для оптимальної СЕФК нелінійними об'єктами, що дасть змогу отримувати системи з бажаними показниками якості перехідних процесів.

– Розвинути напрям аналізу та енергетичної оптимізації усталених режимів роботи складних нелінійних систем на основі лінійної ТДНП, що дасть змогу отримувати завдання для координат керування для СЕМ під час синтезу СЕФК.

– Здійснити аналіз ефективності перетворень потужності в низці складних систем різної природи на основі лінійної ТДНП та розробити рекомендації щодо їх енергетичної оптимізації.

– Розвинути метод моделювання та комп'ютерного симулювання на енергетичній основі EMR в напрямку уточненого моделювання елементів складних ETC як ПГС з енергоформуючим керуванням.

– Застосувати розроблені методи синтезу, аналізу та моделювання до низки сучасних ЕТС різного типу та дослідити ефективність такого застосування.

– Створити макетні зразки низки ЕТС з енергоформуючим керуванням та провести фізичні експерименти з метою підтвердження одержаних теоретичних результатів.

Об'єктом дослідження є динамічні та усталені процеси в керованих нелінійних електротехнічних системах.

Предмет дослідження – методи аналізу, синтезу та моделювання, які базуються на закономірностях процесів перетворення енергії та використовуються під час розроблення систем керування електротехнічними об'єктами.

Методи дослідження. Методи розв'язання алгебраїчних рівнянь, математичного аналізу і лінійної алгебри; методи теорії автоматичного керування, зокрема синтез системи підпорядкованого регулювання, алгебраїчні методи аналізу стійкості, визначення стійкості за Ляпуновим; методи варіаційного числення, зокрема опис систем як ейлер-лагранжевих та гамільтонових з керованими портами, пасивація систем; методи оптимальних систем, зокрема використання рівняння Ріккаті та Гамільтона-Якобі Беллмана; методи лінійної нерівноважної термодинаміки; множинна лінеаризація; використання середовища імітаційного моделювання MATLAB/Simulink, реалізація алгоритмів, дата аналізу, багатовимірної апроксимації та візуалізації у МАТLAB; математичне моделювання, візуалізація та проведення чисельних і символьних розрахунків у середовищі Mathcad, використання методів розв'язання систем нелінійних рівнянь Левенберга-Маркварда, інтерполяції сплайнами, оберненого перетворення Лапласа; систематизація, апроксимація, візуалізація та обробка даних, з апроксимацією характеристичними поліномами у програмі Microsoft Excel; методи експериментальних досліджень.

Наукова новизна одержаних результатів полягає в тому, що в дисертаційній роботі

уперше:

1. Розроблено метод параметричного синтезу лінійних та нелінійних систем енергоформуючого керування, оптимальних за заданим критерієм якості, шляхом формуванням взаємозвязків і демпфування в рівнянні Ріккаті, що дає змогу отримати систему з бажаними показниками якості перехідних процесів.

2. Запропоновано та розроблено 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. 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.

4. 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. Запропоновано та розроблено імпульсний спосіб роботи сонячної автономної водопомпової установки прямого привода завдяки введенню в канал перетворення енергії проміжного суперконденсаторного нагромаджувача електричної енергії, який додатково виконує функцію пошуку точки максимальної потужності сонячних фотоелектричних панелей, що дає змогу забезпечити помпування води з максимальною енергетичною ефективністю незалежно від інтенсивності падаючої на панелі сонячної радіації.

набули подальшого розвитку:

6. 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 регулювальні можливості енергоформуючого керування та реалізовувати необхідні стратегії керування.

7. 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 полягає в наступному.

Поєднання розвинених в роботі методів аналізу, синтезу та моделювання на енергетичній основі вже використовується та може бути використано у подальших дослідженнях і розробках реальних ЕТС. Зокрема, можна виділити такі позитивні сторони цих методів. Запропонований метод синтезу керування складними нелінійними ЕТС дає змогу отримати та проаналізувати оптимальну стійку СЕФК з широкими регулювальними можливостями та визначеною стратегією керування. Модифікована процедура синтезу СЕФК розширює гнучкість САК, параметричний синтез дає змогу отримати оптимальні налаштування ФКВ, оптимізація усталених режимів нелінійних об'єктів на основі ТДНП забезпечує енергоефективні стратегії керування. Удосконалений метод ЕМR уможливлює комп'ютерне симулювання з високою точністю роботи ЕТС на тривалих проміжках часу.

Отримані структури ФКВ СЕФК активної та напівактивної акумуляторносуперконденсаторної гібридних системам нагромадження енергії (ГСНЕ) забезпечують керування згідно СЕМ та можуть бути використані в ЕТС з відповідними енергонагромаджувальними системами.

Запропонований підхід до аналізу SISO систем зі складною нелінійною динамікою на основі лінійної ТДНП дає змогу оцінити ефективність енергоперетворень в елементах ЕТС, а також синтезувати оптимальні з енергетичної точки зору координати їх роботи в усталених режимах, що слугуватимуть завданням (частиною стратегії) керування. Все це може бути використано у подальших дослідженнях та розробках реальних ЕТС, зокрема на базі різного типу синхронних машин з постійними магнітами (СМПМ), сонячних та вітрових електрогенеруючих, а також водопомпових систем.

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», а також у навчальному процесі кафедри ЕКС Львівської політехніки 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». Акти впровадження результатів роботи у вказаних організаціях приведено у додатках до дисертації.

Особистий внесок здобувача полягає у пропозиції та розробленні комплексного підходу до синтезу керування нелінійними ЕТС на основі енергетичних підходів, розвитку методу структурного синтезу та розробленні методу параметричного синтезу СЕФК нелінійними ЕТС, аналізі енергофективності нелінійних ЕТС на основі ТДНП, удосконаленні моделювання ЕТС за методом ЕМR, а також синтезі та дослідженні СЕФК для ЕТС різного типу.

Апробація результатів дисертації. Результати дисертаційної роботи, основні положення та висновки доповідалися та обговорювалися на XXV міжнародній науково-технічній конференції "Проблеми автоматизованого електропривода. Теорія та практика. (ПАЕП)" (м. Кременчук, 2020 р.;), XIV-XV

Conference Advanced International Trends Radioelectronics. on in Telecommunications and Computer Engineering (TCSET) (Slavske, 2018; Slavske, 2019), 38th International conference Electronics and nanotechnology (ELNANO-2018) (Kyiv-2018); III IEEE International conference on intelligent energy and power systems (IEPS-2018) (Kharkiv-2018), I IEEE Ukraine conference on electrical and computer engineering (UKRCON-2017) (Kyiv-2017), науковому семінарі «Моделі та методи комп'ютерного аналізу електричних кіл та електромеханічних систем» Вченої ради НАН України "Наукові основи електроенергетики" (Львів, 2024 р.), науково-прикладній конференції "Krakowskie Dni Elektryka 2019" (м. Краків, Польща, 2019 р.), відкритій лекції в University of Applied Sciences MittelГСНЕеп (м. Гіссен, Німеччина, 2019 р.), на зустрічі з представниками Гданських університетів (м. Гданськ, Польща, 2017 р.), V-VIII міжнародній науковій конференції молодих вчених "Electric Power Engineering and Control Systems (EPECS)" (м. Львів, 2015 р.; м. Львів, 2016 р.; м. Львів, 2017 р.; м. Львів, 2018 р.).

Ступінь використання у дисертації матеріалів і висновків кандидатської дисертації здобувача. Матеріали кандидатської дисертації "Енергоформуюче керування електромеханічними системами на базі синхронної машини з постійними магнітами" Білецького Юрія Олеговича, захищеної 26.12.2014, у докторській дисертації не використовувались.

Публікації. Основний зміст, наукові положення, результати і висновки дисертаційної роботи опубліковано у 33-х наукових працях, зокрема: 1 монографія та 1 розділ колективної монографії, що індексується наукометричною базою Scopus; 5 статей у закордонних виданнях, що індексуються наукометричною базою Scopus (Q1, Q2); 13 статей у наукових фахових виданнях України; 7 матеріалів міжнародних конференцій, що індексуються наукометричною базою Scopus.

Структура та обсяг дисертації. Дисертація складається зі вступу, п'яти розділів, висновків, списку використаних джерел та 7 додатків. Дисертація займає 417 сторінок, містить 110 рисунків, 12 таблиць та 479 назв використаної літератури. Основний зміст дисертації викладено на 295 сторінках.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ

У вступі обґрунтовано актуальність дисертаційної роботи, наведено зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами, сформульовано мету і задачі досліджень, викладено наукову новизну і практичне значення отриманих результатів, дано загальну характеристику роботи.

У першому розділі висвітлено проблему синтезу систем керування сучасними нелінійними об'єктами, а також наведено короткий огляд підходів до їх синтезу, зокрема енергетичних. Розглянуто основні положення методу оптимізації енергоефективних координат керування в усталених режимах роботи на основі лінійної ТДНП. Описано метод моделювання систем на енергетичній основі –енергетичне макропредставлення ЕМR. Новими і перспективними підходами для синтезу систем керування нелінійними ЕТС є енергетичні підходи, які базуються на фізичних законах передачі та перетворення енергії. Виходячи з цих законів, будь-яка пасивна динамічна система може бути описана у формі ПГС:

$$\begin{cases} \dot{\mathbf{x}}(t) = [\mathbf{J}(\mathbf{x}) - \mathbf{R}(\mathbf{x})] \frac{\partial H}{\partial \mathbf{x}} + \mathbf{G}(\mathbf{x}) \cdot \mathbf{u}(t) \\ \mathbf{y}(t) = \mathbf{G}^{\mathrm{T}}(\mathbf{x}) \frac{\partial H}{\partial \mathbf{x}} \end{cases}, (1)$$

де $\mathbf{x} \in \mathbb{R}^n$ – вектор стану; $\mathbf{u} \in \mathbb{R}^m$ – вектор вхідних енергетичних змінних; $\mathbf{y} \in \mathbb{R}^m$ – вектор вихідних енергетичних змінних; $H(\mathbf{x})$ – функція повної енергії (Гамільтоніан системи); $\mathbf{J}(\mathbf{x}) = -\mathbf{J}^T(\mathbf{x})$ – косо-

симетрична матриця, що відображає взаємозв'язки в системі; $\mathbf{R}(\mathbf{x}) = \mathbf{R}^{T}(\mathbf{x}) \ge 0$ – симетрична додатна матриця, що відображає втрати (демпфування) в системі; $\mathbf{G}(\mathbf{x})$ – матриця портів (входів і виходів системи).

Процедура синтезу СЕФК розпочинається з того, що модель керованої системи (традиційно записана у формі Коші алгебраїчними та диференціальними рівняннями, які характеризують різні елементи системи, зв'язані між собою) зводиться до форми опису із вказаною структурою енергетичних компонент (1), де елементи векторів і матриць x, y, u, J(x), R(x), G(x) та H(x) вибираються на основі аналізу роботи об'єкта. Оскільки основною метою СЕФК є забезпечення поведінки об'єкта, що відповідає бажаній, то можна знайти вирази керуючих впливів, які потрібно формувати на вході об'єкта:

$$\mathbf{G}(\mathbf{x}) \cdot \mathbf{u}(t) = \underbrace{\left[\mathbf{J}_{\mathrm{d}}(\mathbf{x}) - \mathbf{R}_{\mathrm{d}}(\mathbf{x})\right]}_{\boldsymbol{\delta a \mbox{\textit{backana cucrema}}}}^{\boldsymbol{\partial H}_{\mathrm{d}}}_{\boldsymbol{\delta x}} - \underbrace{\left[\mathbf{J}(\mathbf{x}) - \mathbf{R}(\mathbf{x})\right]}_{\boldsymbol{\delta f} \mbox{\textit{backana cucrema}}}^{\boldsymbol{\partial H}_{\mathrm{d}}}_{\boldsymbol{\delta c} \mbox{\textit{backana cucrema}}} - \underbrace{\left[\mathbf{J}_{\mathrm{d}}(\mathbf{x}) - \mathbf{R}(\mathbf{x})\right]}_{\boldsymbol{\delta c} \mbox{\textit{backana cucrema}}}^{\boldsymbol{\partial H}_{\mathrm{d}}}_{\boldsymbol{\delta c} \mbox{\textit{backana cucrema}}} - \underbrace{\left[\mathbf{J}_{\mathrm{d}}(\mathbf{x}) - \mathbf{R}(\mathbf{x})\right]}_{\boldsymbol{\delta c} \mbox{\textit{backana cucrema}}}^{\boldsymbol{\partial H}_{\mathrm{d}}}_{\boldsymbol{\delta c} \mbox{\textit{backana cucrema}}} - \underbrace{\left[\mathbf{J}_{\mathrm{d}}(\mathbf{x}) - \mathbf{R}(\mathbf{x})\right]}_{\boldsymbol{\delta c} \mbox{\textit{backana cucrema}}}^{\boldsymbol{\partial H}_{\mathrm{d}}}_{\boldsymbol{\delta c} \mbox{\textit{backana cucrema}}} - \underbrace{\left[\mathbf{J}_{\mathrm{d}}(\mathbf{x}) - \mathbf{R}(\mathbf{x})\right]}_{\boldsymbol{\delta c} \mbox{\textit{backana cucrema}}}^{\boldsymbol{\partial H}_{\mathrm{d}}}_{\boldsymbol{\delta c} \mbox{\textit{backana cucrema}}} - \underbrace{\left[\mathbf{J}_{\mathrm{d}}(\mathbf{x}) - \mathbf{R}(\mathbf{x})\right]}_{\boldsymbol{\delta c} \mbox{\textit{backana cucrema}}}^{\boldsymbol{\partial H}_{\mathrm{d}}}_{\boldsymbol{\delta c} \mbox{\textit{backana cucrema}}} - \underbrace{\left[\mathbf{J}_{\mathrm{d}}(\mathbf{x}) - \mathbf{R}(\mathbf{x})\right]}_{\boldsymbol{\delta c} \mbox{\textit{backana cucrema}}}^{\boldsymbol{\partial H}_{\mathrm{d}}}_{\boldsymbol{\delta c} \mbox{\textit{backana cucrema}}} - \underbrace{\left[\mathbf{J}_{\mathrm{d}}(\mathbf{x}) - \mathbf{R}(\mathbf{x})\right]}_{\boldsymbol{\delta c} \mbox{\textit{backana cucrema}}}^{\boldsymbol{\partial H}_{\mathrm{d}}}_{\boldsymbol{\delta c} \mbox{\textit{backana cucrema}}}^{\boldsymbol{\partial H}_{\mathrm{d}}}_{\boldsymbol{\delta c} \mbox{\textit{backana cucrema}}}^{\boldsymbol{\partial H}_{\mathrm{d}}}_{\boldsymbol{\delta c} \mbox{\textit{backana cucrema}}}_{\boldsymbol{\delta c} \mbox{\textit{backana cucrema}}}^{\boldsymbol{\partial H}_{\mathrm{d}}}_{\boldsymbol{\delta c} \mbox{\textit{backana cucrema}}}^{\boldsymbol{\partial H}_{\mathrm{d}}}_{\boldsymbol{\delta c} \mbox{\textit{backana cucrema}}}^{\boldsymbol{\partial H}_{\mathrm{d}}}_{\boldsymbol{\delta c} \mbox{\textit{backana cucrema}}}^{\boldsymbol{\partial H}_{\mathrm{d}}}_{\boldsymbol{\delta c} \mbox{\textit{backana cucrema}}}_{\boldsymbol{\delta c} \mbox{\textit{backana cucrema}}}^{\boldsymbol{\partial H}_{\mathrm{d}}}_{\boldsymbol{\delta c} \ \boldsymbol{\delta c} \\boldsymbol{\delta c} \ \boldsymbol{\delta c} \ \boldsymbol{\delta$$

де $J_d(x)$ – матриця взаємозв'язків бажаної СЕФК; $R_d(x)$ – матриця демпфування бажаної СЕФК; $H_d(x)$ – функція повної енергії бажаної замкненої СЕФК.

Під час синтезу необхідно вибрати структуру формувачів керуючих впливів (ФКВ) СЕФК, а саме – вигляд матриць системи керування $J_a(x)$ та $\mathbf{R}_a(\mathbf{x})$, а також, при необхідності, доповнювати систему іншими регуляторами. Хоча СЕФК є простими у синтезі, зрозумілими у налаштуванні та забезпечують асимптотичну стійкість нелінійних систем, проте зі зростанням складності досліджуваних систем постає проблема структурного і параметричного синтезу СЕФК, яка потребує пошуку підходів до свого вирішення.

Оптимізацію енергетичної ефективності усталених режимів роботи складних систем, в яких пов'язані явища різної фізичної природи, доцільно проводити на основі лінійної ТДНП, яка дає змогу описати системи за універсальним принципом лінеаризації взаємозв'язку між їх вхідними та вихідними координатами потужності в конкретних робочих точках. Лінійна ТДНП дала змогу успішно вирішити багато складних задач, особливо зі спряженими ефектами. Система розглядається як перетворювач потужності (ППІ) з певною кількістю входів та виходів, проте найпростіше та найчастіше з одним входом та одним виходом. Для останнього випадку розроблено універсальний метод опису ПП системою безрозмірних параметрів та характеристик ефективності його роботи. Цей метод знайшов найбільше застосування в біоенергетиці для опису перетворень вільної енергії в біосистемах, проте його можна успішно застосовувати



Рис. 1. Залежності ТДефективності (а) і нормованої вихідної потужності (б) від нормованого відношення сил при різних ступенях спряженості *q*

для аналізу усталених процесів енергоперетворень у системах будь-якої природи.

Для двох спряжених процесів, до яких належить будь-який ПП, оскільки його вихідні параметри (о – output) визначаються вхідними (i – input), можна записати наступну систему рівнянь потоків Jу вигляді добутків ТД-сил X з відповідними кінетичними коефіцієнтами L:

Коефіцієнт L_{io} пов'язаний зі ступенем спряження $q = L_{io} / \sqrt{L_{ii}L_{oo}}$ між собою вхідного і вихідного процесів у ПП. З метою отримання універсальних характеристик ПП у відносних одиницях, вводяться ще два показники: відношення сил $\chi = X_o / X_i$, та феноменологічне співвідношення $Z = \sqrt{L_{oo}/L_{ii}}$. Важливою характеристикою ПП є ТД-ефективність його функціонування, тобто відношення швидкості, з якою Ви споживає вхідну вільну енергію: $\eta = -Z\chi(Z\chi + q)/(q \cdot Z\chi + 1)$.

Побудувавши графічну залежність при різних значеннях q (рис. 1,а) можна знайти оптимальне з ТД-ефективності приведене відношення точки зору сил $(Z\chi)_{opt-\eta} = -q/(1+\sqrt{1-q^2})$, при якому ТД-ефективність має максимальне значення, рівне $\eta_{\text{max}} = (Z\chi)_{\text{орt-}\eta}^2$. Робота деяких ПП в точці з максимальною ТДефективністю може бути недоцільною, оскільки вихідний процес протікає з малою швидкістю. В таких випадках доцільним варіантом вибору робочої точки ПП може бути режим максимальної вихідної потужності (рис. 1,б). Нормоване вихідної значення потужності виразити наступним можна чином: $p = -\left\lceil (Z\chi) + q \right\rceil \cdot (Z\chi).$

Описаний підхід дає змогу вирішувати складні задачі, зокрема енергетичної оптимізації. Проте вказаний підхід наштовхується на проблеми у випадку моделювання нелінійних систем, що потребує його подальшого розвитку.

Енергетичний підхід до наступного етапу дослідження ЕТС, а саме моделювання за методом EMR, забезпечує макроскопічний погляд на систему з точки зору енергетичних процесів, що мають місце в ній. EMR вирізняється зпоміж інших методів моделювання, оскільки дає змогу об'єднувати взаємозв'язані підсистеми різної фізичної природи за енергетичним принципом їх роботи, а також має чітку процедуру побудови систем керування на основі принципу інверсії. В основу EMR підходу покладено наступні три базові прин-



ципи. Усі елементи системи з'єднані згідно принципу «дія – реакція» з використанням обміну змінними (рис. 2,а). В елементах акумулювання енергії часові залежності вихідних змінних є інтегральними функціями вхідних. Інші ж елементи описуються з використанням взаємодії без інтегральних часових залежностей. Структура системи керування розглядається як інверсія модельованої системи: керування визначає вхідні величини, які подаються в систему залежно від бажаних вихідних величин (рис. 2,б). Внаслідок того, що залежності з похідними є недозволеними, пряма інверсія інтегральних залежностей є неможливою. Тому застосовується непряма інверсія, яка використовує регулятори та зворотні зв'язки.

EMR є графічним методом моделювання, який підкреслює енергетичні обміни всередині системи, представляючи фізичні компоненти та їх взаємозв'яз-

ки через енергетичні потоки. EMR дає змогу інтуїтивно й структуровано репрезентувати причинно-наслідкові зв'язки між компонентами, що спрощує моделювання мультифізичних систем і забезпечує розуміння енергетичного розподілу та втрат у системі. Цей підхід є особливо корисним для складних систем, де різні фізичні домени (електричні, механічні, та ін.) динамічно взаємодіють, адже це полегшує аналіз системи, моделювання, а також визначення керуючих впливів та розробку стратегій керування, що формуються на основі енергетичних потоків. Зі свого боку, СЕФК також використовують поняття енергії для формування стійкого і водночас гнучкого керування складними системами з нелінійностями, невизначеностями та збуреннями. ЕМR дає змогу просто моделювати системи різних доменів за енергетичним підходом та синтезувати керування ними за принципом інверсії. Проте, для низки випадків таке математичне моделювання та керування окремими підсистемами є занадто спрощеним, що приводить до суттєвих похибок в симулюванні. Для усунення цієї проблеми, EMR може бути поєднане з іншими підходами, наприклад, з моделюванням об'єктів як ПГС та енегроформуючим керуванням ними.

Таким чином, постає проблема комплексного розвитку методів синтезу нелінійних ЕТС на енергетичній основі, що охоплює їх динамічний синтез, оптимізацію енергоперетворення в усталених режимах, а також математичне моделювання та комп'ютерне симулювання систем.

У другому розділі представлено результати досліджень в напрямку розвитку методів структурного та параметричного синтезу СЕФК. Зокрема, запропоновано внесення корекції сигналів завдання, що не порушує IDA-PBC процедури структурного синтезу системи керування, зберігає основні властивості пасивної ПГС і суттєво розширює регулювальні можливості СЕФК. Запропоновано параметричний синтез нелінійних СЕФК та базі класичної теорії оптимального керування для знаходження структури та значень елементів матриць додаткових взаємозв'язків і демпфування.

Для порівняння існуючих підходів до синтезу систем керування на енергетичній основі було проведено дослідження системи електроприводоа з векторно керованою СМПМ при малій зміні сигналу завдання та перерегулюванні до 5%. Результати цих досліджень (рис. 3) показали доцільність вибору процедури синтезу СЕФК шляхом IDA-PBC як базової, оскільки інші підходи мають такі недоліки: відсутність додаткових елементів форсування у традиційній РВС системі зумовлює низьку швидкодію САК; система з енергетичним балансуванням забезпечує високу швидкодію САК, однак, окрім складності налаштування, до недоліків такої системи можна віднести наявність похибки у формуванні бажаної точки рівноваги, а також чутливість до параметричних змін керованого об'єкта; СЕФК тільки з IDA-PBC забезпечує високі як статичні, так і динамічні показники, водночас є менш чутливою до параметричних змін та забезпечує асимптотичну стійкість системи; СЕФК на основі IDA-PBC з L2-ланкою забезпечує суттєве форсування перехідних процесів та зменшення статичної похибки за відсутності інформації про момент, однак є високочутливою до зміни сигналу завдання, що призводить до переходу системи керування в зону обмеження і, як наслідок, система стає некерованою.





Крім формування різних взаємозв'язків та демпфування, а також поєднання з іншими підходами до синтезу систем керування, метод IDA-PBC був раніше розвинутий автором в напрямку формування додаткових впливів на поведінку системи, однак запропонований метод він потребував подальшого тео-



ретичного обґрунтування та дослідження. З метою розширення регулювальних можливостей, а також покращення статичних та динамічних властивостей СЕФК, розроблено метод, що дає змогу застосувати знехтувані керуючі впливи на не ке-

Рис. 4. Структурна схема СЕФК електропривода з дією на непрямоконтрольовані контури

ровані безпосередньо частини об'єкта керування, забезпечивши цим широкі можливості регулювання САК і водночас збереження бажаної структури та властивостей замкнутої ПГС. Для цього запропоновано передавати відповідні керуючі впливи через контрольовані кола керування. Ці дії повинні бути частиною потоку енергії у передавальному каналі (контрольовані кола, що використовуються для передачі керуючих впливів), як показано на рис. 4. Оскільки основною метою керування є забезпечення стабільної роботи системи у бажаній точці рівноваги **x**₀, рівняння синтезу ФКВ для нової СЕФК з керуючими впливами крізь керовані контури матиме вигляд:

$$\left[\mathbf{J}_{d}(\mathbf{x}_{new}) - \mathbf{R}_{d}(\mathbf{x}_{new})\right] \partial (H_{d} - H) / \partial \mathbf{x}_{new} - \dot{\mathbf{x}}'(t) = \left[\mathbf{J}(\mathbf{x}) - \mathbf{R}(\mathbf{x})\right] \partial H / \partial \mathbf{x} + \mathbf{G}(\mathbf{x}) \cdot \mathbf{b}(t), (4)$$

де \mathbf{x}_{new} – новий вектор змінних стану; \mathbf{x} – додатковий керуючий вплив у \mathbf{x}_{new} .

Передаючи керуючі впливи через певне коло, запропонований вище підхід виконує компенсацію його інерції через форсування. Наявність форсуючих процесів у системі є небажаним і супроводжується ризиком виникнення коливального процесу. Також у випадку складних нелінійних систем ця процедура може бути суттєво утруднена. Тому запропоновано передавати керуючі впливи через контрольовані кола шляхом корекції сигналів завдання для відповідних кіл. Тоді бажана точка рівноваги буде наступною $\mathbf{x}_{0i_new} = \mathbf{x}_{0i} + f(J_{i+1,1.n}, R_{i+1,1.n}) = \mathbf{x}_{0i} + \mathbf{x}'_{0i}$, де \mathbf{x}'_{0i} є елементом корекції для вибраного сигналу *i*-ого кола.

Запропоновані методи синтезу СЕФК було перевірено на системі напівпровідниковий перетворювач – двигун постійного струму (НП-ДПС):

$$\begin{cases} L_{\rm a} \, \mathrm{d}i_{\rm a} / \mathrm{d}t = u_{\rm c}k_{\rm PC} - C\omega - R_{\rm a}i_{\rm a} \\ J \, \mathrm{d}\omega / \mathrm{d}t = Ci_{\rm a} - Ci_{\rm L} \end{cases}, \quad (5)$$

де L_a і R_a –індуктивність та активний опір обмотки якоря; u_c – напруга керування; k_{PC} – передавальний коефіцієнт НП; C – стала ДПС; i_a – струм якоря; J –

момент інерції привода, $i_{\rm L} = T_{\rm L} / C$ і $T_{\rm L}$ – статичні навантаження за струмом та моментом.

Для даної системи отримано і досліджено (рис. 5) СЕФК шляхом: 1) IDA-PBC; 2) шляхом поєднання з класичним ПІ-регулятором; 3) шляхом форсування керуючих впливів та 4) шляхом корекції сигналу завдання відповідно:

$$1) \begin{cases} u_{c}^{*}k_{PC} = -(i_{a} - i_{a0})r_{1} + \omega_{0}C + R_{a}i_{a0}, \\ i_{a0} = T_{L}/C \end{cases}, \\2) \begin{cases} u_{c}^{*}k_{PC} = -(i_{a} - i_{a0})r_{1} + \omega_{0}C + R_{a}i_{a0} - r_{2}\frac{\omega - \omega_{0}}{C}(r_{1} + R_{a} + sL_{a}), \\ i_{a0} = T_{L}/C \end{cases}, \\2) \begin{cases} u_{c}^{*}k_{PC} = -(i_{a} - i_{a0})r_{1} + \omega_{0}C + R_{a}i_{a0} - r_{2}\frac{\omega - \omega_{0}}{C}(r_{1} + R_{a} + sL_{a}), \\ i_{a0} = T_{L}/C \end{cases}, \\2) \begin{cases} u_{c}^{*}k_{PC} = -(i_{a} - i_{a0})r_{1} + \omega_{0}C + R_{a}i_{a0} - r_{2}\frac{\omega - \omega_{0}}{C}(r_{1} + R_{a} + sL_{a}), \\ i_{a0_new} = [T_{L} - (\omega - \omega_{0})r_{2}]/C \end{cases}, \end{cases}$$

де r_1 та r_2 – коефіцієнти введеного демпфування СЕФК; $u_{\rm PI}$ – вихід ПІрегулятора швидкості; i_{a0} та i_{a0_new} – сигнал завдання на струм; ω_0 – сигнал задання на швидкість. Доповнення СЕФК класичними регуляторами прискорює перехідні процеси порівняно з існуючою СЕФК з r_1 . Результати моделювання підтвердили ефективність внесення впливів на контури, які є основною метою регулювання (у випадку ДПС – кутової швидкості). Введення демпфування r_2 дає змогу суттєво покращити динамічні і статичні показники системи. СЕФК, отримана за методом корекції сигналу завдання, забезпечує кращі показники системи, і тому цей метод було використано в подальших дослідженнях. З метою його використання, розроблено програму в математичному пакеті MathCAD, яка реалізує синтез. Програма дає змогу задавати модель будь якої системи, динамічно змінювати структуру матриць ФКВ та одержувати відповідні рівняння ФКВ. Така автоматизація процедури синтезу ФКВ спрощує та прискорює як розробку, так і аналіз СЕФК новими об'єктами.



Рис. 5. Часові залежності кутової швидкості (а) та струму (б) для СЕФК під час розгону та накидання навантаження в системі електропривода НП-ДПС

Основними труднощами синтезу СЕФК є як вибір структури матриць взаємозв'язків та демпфування (структурний синтез), так і синтез параметрів цих матриць (параметричний синтез). Раніше автором була запропонована методика структурно-параметричного синтезу, яка полягає у формуванні бажаного характеристичного поліному передавальної функції замкненої системи. Однак ця методика має обмеження, а саме – необхідність повної відповідності бажаній замкненій ПГС та відсутність розв'язку для складних нелінійних систем, де корекція сигналів завдання для впливу на непрямоконтрольовані контури не зав-



Рис. 6. Порівняння структурних схем та керуючих впливів оптимального керування (а) і СЕФК (б)

жди є відповідною. Це зумовлює пошук інших шляхів синтезу, наприклад, серед теорії оптимальних систем.

Лінійна теорія оптимального керування дає змогу отримати розв'язок задачі у вигляді матриці зворотних зв'язків за змінними стану, що відповідає принципам енергоформуючого керування (рис. 6). Отож, для лінійних систем можна синтезувати СЕФК, що забезпечує формування впливів як оптимального керування, а його параметри будуть синтезовані аналогічно теорії оптимального керування:

$$\mathbf{J}_{a} = -\frac{1}{2} \left(\mathbf{G} \mathbf{D} \mathbf{R}_{2}^{-1} \left(\mathbf{D}^{-1} \mathbf{G} \right)^{\mathrm{T}} \mathbf{P} - \left(\mathbf{G} \mathbf{D} \mathbf{R}_{2}^{-1} \left(\mathbf{D}^{-1} \mathbf{G} \right)^{\mathrm{T}} \mathbf{P} \right)^{\mathrm{T}} \right), \ \mathbf{R}_{a} = \frac{1}{2} \left(\mathbf{G} \mathbf{D} \mathbf{R}_{2}^{-1} \left(\mathbf{D}^{-1} \mathbf{G} \right)^{\mathrm{T}} \mathbf{P} + \left(\mathbf{G} \mathbf{D} \mathbf{R}_{2}^{-1} \left(\mathbf{D}^{-1} \mathbf{G} \right)^{\mathrm{T}} \mathbf{P} \right)^{\mathrm{T}} \right), \ (6)$$

де $\mathbf{P} - \epsilon$ диний невід'ємний симетричний розв'язок рівняння Ріккаті $[\mathbf{J} - \mathbf{R}]^{\mathsf{T}} \mathbf{D}^{-1} \mathbf{P} + \mathbf{P} \mathbf{D}^{-1} [\mathbf{J} - \mathbf{R}] + \mathbf{R}_{1} - \mathbf{P} \mathbf{D}^{-1} \mathbf{G} \mathbf{R}_{2}^{-1} \mathbf{G}^{\mathsf{T}} \mathbf{D}^{-1} \mathbf{P} = 0; \mathbf{B}$ – матриця входу системи у вигляді простору станів; \mathbf{R}_{1} та \mathbf{R}_{2} – додатно визначені матриці середньоквадратичного критерію якості \mathfrak{I} з сигналами завдання входу \mathbf{u}_{z} і змінних стану \mathbf{x}_{z} , неозначеними множниками лагранжа λ та матрицею коефіцієнтів ситеми \mathbf{A} ;

$$\mathfrak{I} = \int_{0}^{1} \left[\left(\mathbf{x} - \mathbf{x}_{z} \right)^{T} \mathbf{R}_{1} \left(\mathbf{x} - \mathbf{x}_{z} \right) + \left(\mathbf{u} - \mathbf{u}_{z} \right)^{T} \mathbf{R}_{2} \left(\mathbf{u} - \mathbf{u}_{z} \right) - \lambda (t) \left(\mathbf{A}\mathbf{x} + \mathbf{B}\mathbf{u} - \dot{\mathbf{x}} - \mathbf{A}\mathbf{x}_{z} - \mathbf{B}\mathbf{u}_{z} \right) \right] dt.$$

Даний підхід досліджено на прикладі двомасової механічної системи:

$$\begin{cases} J_1 \frac{d\omega_1}{dt} = M - M_{c1} - b_1 \omega_1 - c\Delta\phi - \beta(\omega_1 - \omega_2) \\ J_2 \frac{d\omega_2}{dt} = c\Delta\phi + \beta(\omega_1 - \omega_2) - M_{c2} - b_2 \omega_2 \\ c\frac{d\Delta\phi}{dt} = c(\omega_1 - \omega_2) \end{cases}$$
, (7)

$$\begin{cases} M_1 = M - M_{c1} - b_1 \omega_1 - c\Delta\phi - \beta(\omega_1 - \omega_2) \\ \mu_{c2} = b_2 \omega_2 \\ \mu_{c2} = b_2 \omega_2 \end{cases}$$
, (7)

$$\begin{cases} M_1 = M - M_{c1} - b_1 \omega_1 - c\Delta\phi - \beta(\omega_1 - \omega_2) \\ \mu_{c2} = b_2 \omega_2 \\ \mu_{c2} = b_2 \omega_2 \end{cases}$$
, (7)

$$\begin{cases} M_1 = M - M_{c1} - b_1 \omega_1 - c\Delta\phi - \beta(\omega_1 - \omega_2) \\ \mu_{c2} = b_2 \omega_2 \\ \mu_{c2} = b_2 \omega_2 \end{cases}$$
, (7)

$$\begin{cases} M_1 = M - M_{c1} - b_1 \omega_1 - c\Delta\phi - \beta(\omega_1 - \omega_2) \\ \mu_{c2} = b_2 \omega_2 \\ \mu_{c2} = b_2 \omega_2 \\ \mu_{c1} = b_1 + b_1 \omega_2 - \mu_{c2} - b_2 \omega_2 \\ \mu_{c2} = b_2 \omega_2 \\ \mu_{c2} = b_2 \omega_2 \\ \mu_{c2} = b_1 - b_1 \omega_1 - c\Delta\phi - \beta(\omega_1 - \omega_2) \\ \mu_{c2} = b_2 \omega_2 \\ \mu_{c2} = b_2 \omega_2 \\ \mu_{c2} = b_1 - b_1 \omega_1 - b_1 \omega_2 - \mu_{c2} - b_2 \omega_2 \\ \mu_{c2} = b_1 \omega_1 - b_1 \omega_2 \\ \mu_{c2} = b_1 \omega_1 - b_1 \omega_2 \\ \mu_{c2} = b_1 \omega_2 \\ \mu_{c2} = b_1 \omega_1 - b_1 \omega_2 \\ \mu_{c2} = b_2 \omega_2 \\ \mu_{c2} = b_1 \omega_2 \\ \mu_{c2} = b_2 \omega_2 \\ \mu_{c2} = b_1 \omega_2 \\ \mu_{c2} = b_2 \omega_2 \\ \mu_{c2} = b_1 \omega_2 \\ \mu_{c2} = b_2 \omega_2 \\ \mu_{c2} = b_1 \omega_2 \\ \mu_{c2} = b_2 \omega_2 \\ \mu_{c2} = b_1 \omega_2 \\ \mu_{c2} = b_2 \omega_2 \\ \mu_{c2} = b_1 \omega_2 \\ \mu_{c2} = b_2 \omega_2 \\ \mu_{c2} = b_1 \omega_2 \\ \mu_{c2} = b_2 \omega_2 \\ \mu_{c2} = b_1 \omega_2 \\ \mu_{c2} = b_2 \omega_2 \\ \mu_{c2} = b_1 \omega_2 \\ \mu_{c2} = b_1 \omega_2 \\ \mu_{c2} = b_1 \omega_2 \\ \mu_{c2} = b_2 \omega_2 \\ \mu_{c2} = b_1 \omega_2 \\ \mu_{c2} = b_2 \omega_2 \\ \mu_{c2} = b_1 \omega_2 \\ \mu_{c2} = b_2 \omega_2 \\ \mu_{c2} = b_1 \omega_2 \\ \mu_{c2} = b_2 \omega_2 \\ \mu_{c2} =$$

механізму; c – коефіцієнт жорсткості передачі; $\Delta \phi$ – кут закручування; β – коефіцієнт внутрішнього в'язкого тертя.

Для системи (7) оптимальне керування з середньоквадратичним критерієм якості $\Im = \int_{0}^{\infty} \left[(\mathbf{x} - \mathbf{x}_{z})^{T} \cdot \mathbf{R}_{1} \cdot (\mathbf{x} - \mathbf{x}_{z}) + \mathbf{R}_{2} \cdot (\mathbf{u} - \mathbf{u}_{z})^{2} \right] dt$, де \mathbf{R}_{1} одинична матриця, а $\mathbf{R}_{2} = 0.5$, було синтезовано як

$$\mathbf{u} = (\mathbf{I} - \mathbf{K}\mathbf{A}^{-1}\mathbf{B})\mathbf{u}_{z} - \mathbf{K}\mathbf{x} \to M = 5,944u_{z} - 0,6642\omega_{1} - 1,808\omega_{2} + 0,1636\,\Delta\varphi.$$
(8)

Це відповідає СЕФК з параметрами, синтезованими за виразами (6):

$$M = R_{a11} (\omega_{01} - \omega_1) + 2J_{a12} (\omega_{02} - \omega_2) + 2J_{a13} (\Delta \varphi_0 - \Delta \varphi) + M_{c1} + M_{c2} + b_1 \omega_{01} + b_2 \omega_{02}.$$
(9)

Проведені порівняльні дослідження обох систем (рис. 7) показали, що отриманий ФКВ СЕФК (9) забезпечує ідентичну поведінку системи, як і система оптимального керування, а отже, синтезовані значення параметрів ФКВ також забезпечують мінімізацію заданого критерію якості, що і було метою параметричного синтезу.

Для нелінійної ПГС її модель повинна бути модифікована, щоб синтезувати оптимальне керування і компенсувати нелінійності:



Рис. 7. Часові залежності зміни кутових швидкостей першої (1) та другої (2) мас під час прискорення системи оптимального керування (а) та СЕФК (б)

$$\begin{cases} \mathbf{x}\mathbf{1} = \left[\mathbf{J}^* - \mathbf{R}^*\right] \frac{\partial H}{\partial \mathbf{x}\mathbf{1}} + \mathbf{G}\left(\mathbf{u} + \mathbf{G}^{-1}\left[\mathbf{J}^{**}(\mathbf{x}\mathbf{1}) - \mathbf{R}^{**}(\mathbf{x}\mathbf{1})\right] \frac{\partial H}{\partial \mathbf{x}\mathbf{1}}\right) = \left[\mathbf{J}^* - \mathbf{R}^*\right] \frac{\partial H}{\partial \mathbf{x}\mathbf{1}} + \mathbf{G}\mathbf{u}^* \\ \mathbf{y} = \mathbf{G}^{\mathrm{T}} \frac{\partial H}{\partial \mathbf{x}\mathbf{1}} \end{cases}, \quad (10)$$

де матриці системи розкладені на лінійні (одна зірочка) та нелінійні (дві зірочки) елементи: $\mathbf{J}(\mathbf{x}1) = \mathbf{J}^* + \mathbf{J}^{**}(\mathbf{x}1)$ та $\mathbf{R}(\mathbf{x}1) = \mathbf{R}^* + \mathbf{R}^{**}(\mathbf{x}1)$.

Для прикладу, синтезовано СЕФК нелінійною системою електропривода на базі СМПМ:

$$\begin{cases} L_{d} \frac{di_{d}}{dt} = u_{d} - Ri_{d} + p \omega L_{q}i_{q} \\ L_{q} \frac{di_{q}}{dt} = u_{q} - Ri_{q} - p \omega L_{d}i_{d} - p \omega \psi_{pm} \\ J_{m} \frac{d\omega}{dt} = \frac{3}{2} p_{p} \Big[(L_{d} - L_{q})i_{d}i_{q} + \psi_{pm}i_{q} \Big] - T_{L} - b\omega \end{cases}$$
(11)

Γ

де i_d і i_q – складові струму якоря по осях d і q; L_d і L_q – індуктивності обмотки якоря по осях d і q; R – активний опір фазної обмотки якоря; p – кількість пар полюсів; ω – кутова швидкість машини; $\psi_{\rm pm}$ – амплітуда потокозчеплення обмотки

якоря з парою полюсів ротора; $J_{\rm m}$ – момент інерції привода; $T_{\rm L}$ – момент статичного навантаження; b – коефіцієнти зовнішнього в'язкого тертя.

Синтезоване рівняння ФКВ для такої системи має наступний вигляд:

$$\begin{bmatrix} u_{d} \\ u_{q} \\ T \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Ri_{q0} - R_{a22}(i_{q} - i_{q0}) - 2R_{a23}(\omega - \omega_{0}) - p\omega L_{q}i_{q} \\ Ri_{q0} - R_{a22}(i_{q} - i_{q0}) - 2R_{a23}(\omega - \omega_{0}) + p\psi_{pm}\omega_{0} + p\omega L_{d}i_{d} \\ \frac{2}{3}b\omega_{0} - p\psi_{pm}i_{q0} - p(L_{q} - L_{d})i_{q}i_{d} \end{bmatrix}, \quad (12)$$

де *R*_{a11}, *R*_{a22}, *R*_{a12} – елементи матриць системи керування.

Відповідно до запропонованого підходу, налаштування ФКВ k_{11} , k_{22} , k_{12} знаходяться з (6) і доповнюються елементами нелінійної компенсації, як показано нижче:

14

$$\begin{bmatrix} \mathbf{J}_{a} - \mathbf{J}^{**}(\mathbf{x1}) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & -pL_{q}i_{q} \\ 0 & 0 & pL_{d}i_{d} - \frac{L_{q}k_{23}}{2} \\ pL_{q}i_{q} & \frac{L_{q}k_{23}}{2} - pL_{d}i_{d} & 0 \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} \mathbf{R}_{a} - \mathbf{R}^{**}(\mathbf{x1}) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_{d}k_{11} & 0 & 0 \\ 0 & L_{q}k_{22} & \frac{L_{q}k_{23}}{2} \\ 0 & \frac{L_{q}k_{23}}{2} & 0 \end{bmatrix}, (13)$$

де k₁₁, k₂₂, k₁₂ – числові значення параметрів СЕФК, знайдені з матриці Ріккаті.

Для підтвердження коректності запропонованого підходу були проведені порівняльні дослідження (рис. 9) на комп'ютерній симуляційній моделі та експериментальній установці (рис. 8). Остання складається з комп'ютерної системи керування 1, багатополюсної СМПМ 2 та машини постійного струму як навантаження 3, які з'єднані ремінною передачею 4, а також енкодера 5.



Рис. 8. Дослідна установка

Рис. 9. Часові залежності зміни складової струму *i*_q (...) та кутової швидкості ω (___) у математичному моделюванні та фізичній дослідній установці

Як видно з рис. 9, отримані експериментально результати добре узгоджуються з результатами комп'ютерного симулювання. У зв'язку з обмеженнями дослідної установки, більшість дослідів було виконано на низькій частоті обертання, що привело до значних коливань. Таким чином, можна зробити висновок, що запропонований підхід до параметричного синтезу шляхом формування оптимального енергоформуючого керування є дієвим.

У третьому розділі представлено результати досліджень в новому напрямку математичного моделювання усталених режимів роботи ЕТС на основі положень лінійної ТДНП. Зокрема, з використанням опису закономірностей роботи нелінійних ЕТС як множинно лінеаризованих універсальних ПП проведено дослідження щодо ефективності перетворення енергії в трьох достатньо складних ЕТС (векторно двозонно керована СМПМ, вітротурбіна з СГПМ, сонячна водопомпова установка) та визначенні оптимальних з точки зору максимальної енергетичної ефективності координати їх роботи.

Повна динамічна математична модель СМПМ з врахуванням втрат в сталі має наступний вигляд:

де v_d і v_q – складові напруги якоря по осях d і q; i_{d0} і i_{q0} – моментоформуючі складові струму якоря

$$\begin{cases} L_{d} \frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}t} i_{d0} = -i_{d0} \frac{R}{A} + p \,\omega L_{d} i_{q0} + \frac{1}{A} v_{d} \\ L_{q} \frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}t} i_{q0} = -i_{q0} \frac{R}{A} - p \,\omega \left(L_{d} i_{d0} + \psi_{\mathrm{pm}} \right) + \frac{1}{A} v_{q} , (14) \\ J_{\mathrm{m}} \frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}t} \omega = \frac{3}{2} p \left[\psi_{\mathrm{pm}} i_{q0} + \left(L_{d} - L_{q} \right) i_{d0} i_{q0} \right] - T_{\mathrm{L}} \end{cases}$$

по осях d і q; $A = 1 + R/R_c$; R_c – активний опір, що моделює втрати в сталі.

Провівши дослідження, одержано модель СМПМ з ПМ, розміщеними на поверхні ротора (SPMSM), для якої $L_d = L_q$, як ПП та вирази його основних безрозмірних параметрів:

$$\begin{cases} \left(\sqrt{\frac{3}{2}}i_{q}\right) = \frac{1}{R}\left(\sqrt{\frac{3}{2}}v_{q}\right) - \sqrt{\frac{3}{2}}\frac{p\psi_{\rm pm}}{R}\omega & q = -(A)^{-0.5} \\ -T_{\rm L} = -\sqrt{\frac{3}{2}}\frac{p\psi_{\rm pm}}{R}\left(\sqrt{\frac{3}{2}}v_{q}\right) + \frac{3}{2}\frac{A(p\psi_{\rm pm})^{2}}{R}\omega & Z\chi = \sqrt{A}p\psi_{\rm pm}\frac{\omega}{v_{q}}. \end{cases}$$
(15)

Це дало змогу знайти оптимальні точки енергетичної ефективності машини при різних моментах навантаження та швидкостях (рис. 10), та побудувати карту її ефективності (рис. 11). Отож, енергетична ефективність роботи SPMSM з врахуванням втрат в сталі відповідно до критерію $i_d = 0$ безпосередньо залежить від робочих параметрів привода – кутової швидкості та моменту статичного навантаження. Тільки за вказаних на рис. 10 комбінацій цих параметрів можливе досягнення максимально можливої ефективності. Інших способів її підвищення в даному випадку немає.





Рис. 10. Оптимальна залежність між параметрами ω та *T*_L, за якої SPMSM з врахуванням втрат в сталі працює в точках максимальної енергетичної ефективності

Рис. 11. Карта енергетичної ефективності дослідної SPMSM

Для СМПМ з ПМ, розміщеними всередині ротора (IPMSM), для якої $L_d < L_q$, вже в першій зоні регулювання кутової швидкості енергетична ефективність ії роботи залежить також від значення складової струму якоря i_d . Навіть для класичного випадку (без врахування втрат в сталі) не можливо отримати аналітичні вирази для залежностей оптимальних значень складових струму якоря i_d та i_q від величини лише моменту статичного навантаження (крива максимуму моменту на ампер MTPA). З урахуванням втрат в сталі, навіть за допомогою такої достатньо простої моделі, яку використано в цій роботі, таких аналітичних залежностей тим більше отримати не вдасться. Тому, з метою чисельної енергетичної оптимізації IPMSM з врахуванням втрат в сталі, введено ще одну варіативну змінну – i_{d0} , яка визначає реактивну складову електромагнітного моменту. Подальші розрахунки моделі IPMSM як ПП, кінетичних коефіцієнтів та безрозмірних параметрів виконано у функції від цієї змінної. Крім цього, дослідженнями показано, що для врахуванням нелінійності моделі потрібно провести множинну лінеаризацію залежності вхідної сили – діючого значення напруги якоря $v_a(i_{d0})$ – від кутової швидкості машини. Це привело до множини ПП для низки робочих швидкостей, причому усі параметри цих ПП залежать також від i_{d0} . З метою реалізації даного процесу, розроблено програму в математичному пакеті Mathcad, яка дає змогу розраховувати вказані параметри і показники роботи множини ПП, що моделюють роботу дослідної IPMSM з врахуванням втрат в сталі для різних робочих точок машини (ω і *T*) в залежності від складової струму якоря i_{d0} .

Для перевірки правильності роботи складеного алгоритму, перший обчислювальний експеримент проведено для варіанту, результати якого можна обчислити за відомими алгоритмами – для оптимального з точки мінімуму втрат режиму роботи IPMSM без врахування втрат в сталі (табл. 1). Відхилення отриманих за розробленим алгоритмом (i_d) від відповідних значень, отриманих за відомим алгоритмом (i_{d0}), менші 5% за номінального моменту навантаження двигуна. Це є допустимим результатом для даних досліджень і свідчить про адекватність запропонованого методу дослідження та алгоритму розрахунку параметрів і показників роботи IPMSM і з врахуванням втрат в сталі.

Таблиця 1

Порівняння оптимальних значень складової струму *i*_d, отриманих за розробленим алгоритмом, від відповідних значень, отриманих за відомим алгоритмом

$T_{\rm L}, { m H}$ ·м	25	50	75	100
i_{d0}, A	-3,0	-11,5	-21,5	-31,5
i_d , A	-2,15	-12,58	-22,86	-32,99

Дослідження залежностей ступенів спряженості множини ПП, параметрів їх оптимальної робочої точки та максимальної енергетичної ефективності показали, що врахування втрат в сталі приводить до зниження модуля коефіцієнта спряженості ПП, та зміщення його максимуму в сторону більших значень (за модулем) від'ємної складової струму i_{d0} . Значення максимальної енергетичної ефективності знижуються при врахуванні втрат в сталі на 5-17%. Точки максимальної енергетичної ефективності теж зміщуються в сторону більших значень складової струму i_{d0} , які є дуже близькими до аналогічних значень цього струму, за яких забезпечується максимальне значення коефіцієнта спряженості.

На рис. 12,а представлена карта енергетичної ефективності, отримана для експериментального IPMSM з урахуванням втрат в сталі, який працює в точках максимальної енергоефективності при оптимальних значеннях складової струму $i_{d0.opt}$. Наведена залежність плавна, похибка інтерполяції не перевищувала 2%. Порівняння отриманої карти ефективності для IPMSM з картою ефективності для SPMSM (рис. 11) показує вищі значення енергоефективності першої над другою, зокрема більш широку зону максимальної – 0,8 і вище. Таким чином, наявність ще однієї варіативної координати – складової струму i_{d0} – дає змогу забезпечити роботу IPMSM з врахуванням втрат в сталі в точках максимальної енергетичної ефективності. Розроблена методика дає можливість отримати оп-

тимальні значення *i*_{d0.opt} для кожної пари значень робочої точки привода – кутової швидкості та моменту навантаження, і сформувати стратегію керування.



Рис. 12. Карти енергетичної ефективності, отримані для дослідного IPMSM при роботі в першій (а) та другій (б) зонах регулювання кутової швидкості

$$\begin{cases} F = L_{\rm ii}V_{\rm w} + L_{\rm io}\omega \\ -T_{\rm WT} = L_{\rm oi}V_{\rm w} + L_{\rm oo}\omega \end{cases}, \quad (1$$

Розроблений на основі лінійної ТДНП алгоритм було використано і для оптимізації в другій зоні регулювання кутової швидкості IPMSM – вище номінальної. Відмінністю роботи в другій зоні є наявність обмеження за напругою якоря, що зумовлено величиною DC напруги живлення інвертора, а також обмеження за струмом якоря в тривалому режимі роботи, що зумовлено нагріванням двигуна. Для другої зони IPMSM значення складової струму якоря *i*_{d0} забезпечує роботу машини на кривій обмеження за напругою якоря, де і забезпечується оптимальна стосовно енергетичної ефективності робота. Отримана для дослідного двигуна карта енергетичної ефективності приведена на рис. 12,6. Запропонований метод дає також можливість легко визначити складові втрат потужності від нерівноважності процесу, якими є втрати в міді, та від неповної спряженості між входом та виходом ПП, якими в даному випадку є втрати в сталі.

Запропонований підхід було використано з метою дослідження енергоефективності системи перетворення енергії у вітроенергетичній установці (ВЕУ). Така система складається з двох ПП різної природи зі спряженими ефектами – вітротурбіни та генератора – і потребує детального аналізу.

Модель вітротурбіни (WT) як ПП отримано у вигляді:

де *F* – сила, що діє на вітроколесо; *V*_w – швидкість
6) вітрового потоку; ω – кутова швидкість; *T*_{WT} – момент на валі вітротурбіни.

Оскільки математична модель процесів у WT (в модемі взято WT з вертикальною віссю обертання – VAWT) є суттєво нелінійною, то система лінійних рівнянь (16) справедлива лише в околі заданої робочої точки. Тому для знаходження кінетичних коефіцієнтів ПП було виконано множинну лінеаризацію прямими, як показано на рис. 13 в точках 1, 2, 3 оптимальної роботи VAWT за різних V_w . На рис. 14 наведено залежності абсолютних значень потужності дослідної VAWT від її кутової швидкості для трьох значень швидкості вітру, отримані на основі моделі ПП (16) (криві 1) лише для одного ПП з параметрами точки оптимальної роботи VAWT.







Рис. 14. Залежності вихідної потужності дослідної VAWT від її кутової швидкості за різних швидкостей вітру

За оптимальних значень кутової швидкості вихідна потужність дослідної VAWT досягає максимального значення. Проте, як видно з рис. 13, за відхилення кутової швидкості від оптимальної реальний момент WT зменшується в порівнянні з лінеаризованими значеннями, що відповідають прямій 1. Тобто за відхилення від точки оптимальної роботи точність моделювання VAWT лінійним ПП знижується. В подальшому, після розгляду всієї ВЕУ, оптимізація її роботи забезпечуватиметься виходячи з системного критерію – максимуму отримуваної на виході генератора електричної потужності. Це призводитиме до деякого відхилення робочої точки VAWT від її оптимального режиму. Тому, з метою підвищення точності математичного опису, доцільно моделювати VAWT не одним лінійним ПП, а цілою низкою ПП з дещо різними параметрами, отриманими для поточної кутової швидкості VAWT шляхом лінеаризації характеристики $T_{wr}(\omega)$ у цій точці. Для цього було розроблено програму в середовищі MathCad яка виконує множинну лінеаризацію характеристик $T_{wT}(\omega)$. Тоді параметри ПП залежатимуть не лише від V_w, а й від ω , і нові залежності абсолютних значень потужності набудуть вигляду кривих 2 на рис. 14.

Аналогічно розроблено модель синхронного генератора з постійними магнітами PMSG як ПП та побудовано залежності його параметрів від кутової швидкості, зокрема $Z\chi$ (рис. 15,а) та η (рис. 15,б). Тоді застосовано методику аналізу якості, з точки зору ефективності перетворення енергії, двох каскадно з'єднаних пристроїв – VAWT та PMSG у ВЕУ (рис. 15,в,г). Було виявлено неоптимальність каскадного з'єднання цих складових ПП у дослідній ВЕУ.

Проведений аналіз дав змогу виявити нові аспекти енергетики цієї системи та накреслити шляхи щодо підвищення ефективності всього комплексу. При цьому VAWT та PMSG вперше було математично описано як лінійні ПП з можливістю лінеаризації їх у точках роботи в заданому діапазоні спільної кутової швидкості. До дієвих шляхів підвищення ефективності відносяться зміна аеромеханічної характеристики VAWT та кута зсуву φ між векторами напруги та струму якоря PMSG за номінальної його кутової швидкості та номінального навантаження. Зокрема, дослідження впливу на якість з'єднання ПП заданого кута зсуву (рис. 16) дало змогу обґрунтувати оптимальне для дослідної ВЕУ



Рис. 15 Залежності параметра робочої точки (*Z*χ)_G (а) та енергетичної ефективності η_G (б) PMSG як ПП від його кутової швидкості, а також цих параметрів для PMSG, що приводиться дослідною VAWT (в, г), відповідно



Рис. 16. Залежності ефективності ВЕУ від значення номінального кута зсуву φ між векторами напруги та струму якоря PMSG за різних швидкостей вітру

значення цього кута, рівне 40°, за якого забезпечується найкраще наближення до оптимального з'єднання досліджуваних ПЕ в діапазоні середніх та високих швидкостей вітру.

Запропонований метод аналізу було використано і для фотоелектричних сонячних установок для помпування води (СУПВ), що складаються з фотоелектричної панелі, DC-DC перетворювача, системи електроприводу та відцентрової помпи (ВП). Робочі характеристики

«напір – витрата» ВП є суттєво нелінійними. Побудована лінеаризована в околах робочих точок модель механо-гідравлічного ПП має вигляд

$$\begin{cases} T = L_{\rm ii}\omega + L_{\rm io}p \\ -Q = L_{\rm oi}\omega + L_{\rm oo}p \end{cases}, (17)$$

де *p* – тиск води в гідравлічній системі; *Q* – продуктивність помпи.

Результати досліджень такої системи показані

на рис. 17. Найбільш дієвим параметром робочого режиму ВП є висота підйому води. Тому для заданої водяної продуктивності доцільно вибирати ВП, розраховану на вищу порівняно з номінальним значенням висоту підйому води. Це не лише безпосередньо збільшить енергетичну ефективність роботи ВП, а й розширить діапазон робочих її швидкостей за неминучого сезонного, добового та погодного зниження інтенсивності сонячної радіації. Все це разом забезпечить значне збільшення річної водяної продуктивності автономних СУПВ прямого привода.

Проведені дослідження також показали, що якщо розширити досліджуваний механо-гідравлічний ПП, додавши до нього ще й електричний двигун разом зі своїм напівпровідниковим перетворювачем, то в отриманому електрогідравлічному ПП отримані закономірності перетворення потужності збережуться, оскільки втрати потужності в механо-гідравлічній системі значно перевищують втрати потужності в електромеханічній системі.





У четвертому розділі представлено результати досліджень у напрямку застосування запропонованих енергетичних підходів до різних ЕТС, актуальних на сьогодні. Досліджено можливості синтезу СЕФК нелінійними MISO та MIMO системами, а саме двозонним електроприводом на базі ДПС з незалежним збудженням (НЗ), гібридними системами накопичення енергії (ГСНЕ) для електричних транспортних засобів (ЕТЗ), DC-DC перетворювачем та сонячними водопомповими установками (СУПВ), а також реалізації ними заданих стратегій керування. Запропоновано нову конструкцію СУПВ прямого привода з проміжним суперконденсаторним нагромаджувачем енергії.

Відповідно до запропонованої процедури синтезу СЕФК було одержано систему двозонного регулювання швидкістю нелінійного електропривода на базі ДПС НЗ:

$$\begin{cases} k_{\rm PC} u_{\rm k} = i_{{}_{\theta}0} R_{\rm a} + (i_{{}_{\theta}0} - i_{\rm a}) j_{{}_{\rm ra11}} + K i_{{}_{f}0} \omega_0 L_{\rm f} \\ k_{\rm PC} u_{\rm f} = i_{{}_{f}0} R_{\rm f} + (i_{\rm a} \omega_0 - i_{{}_{\theta}0} \omega) (K L_{\rm f}) + (i_{{}_{f}0} - i_{\rm f}) j_{{}_{\rm ra33}} (1) \\ i_{{}_{a}0} = \left[T_{\rm L} - (\omega - \omega_0) j_{{}_{\rm ra22}} \right] / K i_{{}_{f}0} L_{\rm f} \end{cases}$$

де $L_{\rm f}$ і $R_{\rm f}$ – індуктивність і активний опір обмотки збу-7) дження (O3); $u_{\rm f}$ – напруга живлення O3; $\Phi = i_{\rm f} L_{\rm f}$ – магнітний потік; $i_{\rm f}$ – струм збудження; j_{raij} – параметри

СЕФК; $i_f = f(\omega_0)$ – завдання на струм збудження відповідно до стратегії керування.



Рис. 18. Часові залежності кутової швидкості (а,в) та струму збудження (б,г) в порівняльних комп'ютерних дослідженнях СЕФК з адаптивним сигналом завдання при різними налаштуваннях в першій зоні (а,б) та в другій зоні (в,г)

Хоча врахування всіх нелінійностей у моделі складної ЕМС призводить до ускладнення процедури синтезу і кінцевих рівнянь ФКВ, однак, запропонована процедура синтезу СЕФК дає змогу їх врахувати іншими способами, зокрема корекцією сигналу завдання, що враховуватиме нелінійність та дає змогу одержати СЕФК з високими статичними і динамічними показниками. Наявність механічного демпфування забезпечує незалежність динамічних показників від величини кутової швидкості. Коректування сигналу завдання не тільки зберігає властивості бажаної ПГС, а й забезпечує вищу швидкодію системи.

Наступним об'єктом дослідження були ГСНЕ автономних сонячних фотоелектричних станцій (ФЕС). ГСНЕ є нелінійними, оскільки майже всі їх компоненти є нелінійними: вольт-амперні характеристики акумуляторної батареї (АБ) та суперконденсатора (СК), вхідні/вихідні характеристики DC-DC перетворювачів. Крім того, ці динамічні системи є МІМО системами з двома каналами керування – вектор керування **µ**. ГСНЕ складається з під'єднаних паралельно до DC шини, через DC-DC перетворювачі, модуля фотоелектричних панелей (DC-DC виконує функцію пошуку точки максимальної потужності – MPPT), модуля СК, АБ, а також безпосередньо підключеного навантаження. З поміж багатьох ФКВ, синтезованих для регулювання щілинностей DC-DC перетворювачів АБ μ_1 та СК μ_2 було виділено наступні найкращі:

$$\Phi \text{KB1:} \quad \mu_{1} = 1 - \frac{V_{b}}{V_{bus}^{*}}; \quad \mu_{2} = 1 - \frac{V_{sc}^{*}}{V_{bus}^{*}};$$

$$\Phi \text{KB2:} \quad \mu_{1} = 1 - \frac{V_{b}}{V_{bus}^{*}}; \quad \mu_{2} = 1 - \frac{V_{sc}^{*} + r_{33} i_{sc}}{V_{bus}^{*}};$$

$$\Phi \text{KB3:} \quad \mu_{1} = 1 - \frac{V_{b} + j_{12} (v_{dc} - V_{bus}^{*})}{V_{bus}^{*}};$$

$$\mu_2 = 1 - \frac{V_{\rm sc}^* + j_{23} (v_{\rm dc} - V_{\rm bus}^*) + r_{33} i_{\rm sc}}{V_{\rm bus}^*},$$

де V_b – напруга АБ; V_{bus}^* – бажана напруга DC шини; V_{sc}^* – бажана напруга CK; i_{sc} – струм через CK; v_{dc} – напруга DC шини; r_{33} , j_{12} та j_{23} – параметри налаштування CEФК; бажані значення формуються CEM.

Як показали імітаційні дослідження (рис. 19), для ФЕС з активною АБ-СК ГСНЕ отриманий ФКВ2 повністю задовольняє задану стратегію. У випадку напівактивної АБ-СК

ГСНЕ (АБ підключений напряму до DC шини) найкращі результати дає ФКВЗ, який дає змогу забезпечити плавний характер зміни струму АБ при значному зменшенні індуктивності DC-DC перетворювача АБ (з 30 мГн до 2 мГн).

З метою верифікації отриманих результатів досліджень, створено макетний взірець АБ-СК ГСНЕ напівактивної конфігурації (рис. 20,а) та проведено порівняльні дослідження для ФКВ $\mu = 1 - (V_{sc}^* + r_{11}i_b + r_{33}i_{sc})/v_b$, де r_{11} – параметр СЕФК.

Порівняння результатів комп'ютерного симулювання (рис. 20,6) з аналогічними результатами експериментальних досліджень (рис. 20,в) показує їх добре сходження, що свідчить про адекватність проведених математичного моделювання та комп'ютерного симулювання.



Рис. 19. Часові залежності симулювання роботи ФЕС з активною (суцільна) та напівактивною (пунктирна) конфігураціями АБ-СКМ ГСНЕ: а) струм СКМ, б) струм навантаження, в) струм АБ, г) напруга DC шини



Рис. 20. Макетний взірець АБ-СК ГСНЕ (а), часові залежності струмів в основних колах системи, отримані під час комп'ютерного симулювання (б) та експериментально (в): зверху вниз – струм навантаження, струм АБ та струм СК

Розроблено СЕФК електроживлення ЕТЗ на базі АБ-СК ГСНЕ, що може працювати в широкому діапазоні навантажень і дає змогу обмежувати струм АБ, збільшуючи її термін експлуатації. Оптимальні ФКВ синтезовано для малих та великих навантажень, а перемикання між ФКВ відбувається в ковзному режимі, що нівелює коливання. Результати моделювання показали, що запропонований СЕФК забезпечує реалізацію заданих стратегій керування з використанням від одного до трьох давачів: напруги АБ, струму СК та напруги DC шини.

Вперше розроблено СФЕК для АБ-СК ГСНЕ з багаторівневим СК модулем (рис. 21), інтегрованим з каскадним DC-DC перетворювачем, що дає змогу реалізувати СКМ і водночас потребує у вісім разів менше параметрів для налаштування порівняно з існуючими системами, побудованими за класичними підходами.

Синтезовано СЕФК СУПВ, що складається з фотоелектричної панелі РVA, акумуляторної батареї В, зовнішнього навантаження DC Load, та відцентрової помпи СР з системою електропривода на базі безщіткового двигуна постійного струму (БДПС) BLDCM. Керування роботою СУПВ здійснюється за допомогою трьох DC-DC перетворювачів та інвертора напруги Inv (рис. 22). Для цього





розроблено систему енергетичного менеджменту з алгоритмом, що передбачає роботу в усіх можливих режимах передачі енергії між підсистемами (наприклад, рис. 22) та потребує різних ФКВ для керування DC-DC2 та DC-DC3:

$$\mu_{2} = 1 - \frac{v_{b}}{V_{bus}^{*}} + j_{13} \left(1 - \frac{v_{bus}}{V_{bus}^{*}} \right) - r_{33} \frac{\dot{i}_{b}}{V_{bus}^{*}}, \\ \mu_{3} = 1 - \frac{V_{DC}^{*}}{v_{bus}} + j_{34} \left(\frac{V_{DC}^{*} - v_{DC}}{v_{bus}} \right) - r_{33} \frac{\dot{i}_{load}}{v_{bus}},$$

де v_{bus} – напруга проміжної ланки постійного струму; v_{DC} – напруга DC навантаження; V_{DC}^* – бажана напруга DC навантаження.

Ці ФКВ перемикаються залежно від рівня заряду АБ та поточних рівнів двох основних збурень – інтенсивності сонячного опромінювання та потужності споживання електроенергії (рис. 23). Розроблена методика розрахунку пара-



Рис. 22. Приклад режиму роботи СУПВ, коли батарея заряджається

метрів усіх пристроїв, що входять до складу СУПВ запропонованої конфігурації, також узгоджується із завданнями СЕМ. У результаті одержано СУПВ з додатковими функціями накопичення виробленої електроенергії в АБ та живлення зовнішніх споживачів що керується СЕФК з урахуванням енергозбереження, включаючи необхідність роботи з ШІМ лише одного з DC-DC перетворювачів у всіх режимах.

24



Рис. 23. Результати моделювання СУПВ з повністю зарядженою АБ та змінами в широкому діапазоні збурюючих факторів: а) струм РVA, б) напруга проміжної ланки постійного струму, в) струм АБ, г) напруга DC навантаження

У найбільш поширених СУПВ прямого привода енергетична ефективність роботи відцентрової помпи стрімко знижується зі зменшенням інтенсивності падаючої сонячної радіації *G*. Для підвищення загальної ефективності роботи автономної СУПВ прямого привода, у роботі запропоновано пульсуючий режим роботи відцентрової помпи СР з електроприводом на основі BLDCM завдяки введенню в канал потоку енергії проміжного суперконденсаторного накопичувача енергії SCM (рис. 24), що забезпечує максимальну ефективність СР під час її робочого імпульсу. Крім того, у запропонованій конфігурації автономної СУПВ функція МРРТ також покладена СКМ, що реалізується простим і ефективним керуванням одним транзисторним ключем S, що забезпечуює ко-



Рис. 24. Функціональна схема автономної СУПВ прямого привода з проміжним СК нагромаджувачем енергії



Рис. 25. Отримані залежності напруг перемикання дослідного PVM від *G* для температури PVM 40 °C

ливання напруги SCM під час його заряджання та розряджання в зоні максимуму потужності РVМ (рис. 25). В окремому досліджуваному випадку розроблена система показала на 64% вищу річну продуктивність на географічній широті м. Львова порівняно з СУПВ прямого привода традиційної конфігурації. Все це було досягнуто як за рахунок забезпечення роботи помпи з ККД, близьким до номінального, так і завдяки її роботи у всьому діапазоні інтенсивності сонячного опромінення і температурних умов. Одержані результати підтверджено експериментальними дослідженнями на створених макетних взірцях СУПВ прямого привода традиційної за запропонованої конфігурацій (рис. 26).



Рис. 26. Макетний взірець СУПВ

В усіх проведених дослідженнях застосовано розроблений метол структурного синтезу СЕФК, що дає змогу швидко розв'язати у символьвигляді ному складне векторноматричне рівняння та отримати всі можливі варіанти ФКВ. Подальші дослідження СЕФК на комп'ютерних моделях дають змогу сформувати варіанти ФКВ з найкращою комбінацією взаємозв'язків та демпфувань,

що найкраще реалізують обрану стратегію керування.

У п'ятому розділі представлено результати досліджень у напрямку математичного моделювання та комп'ютерного симулювання складних нелінійних систем на енергетичній основі. Запропоновано новий метод математичного моделювання, який полягає у поєднанні методу EMR та СЕФК. Досліджено можливість застосування запропонованого підходу до електроприводів на основі різних типів СМПМ, а також розроблено EMR САК дводвигунного передньоприводного електромобіля з електронним диференціалом.

Пропонована комбінація EMR та енергоформуючого керування об'єднує переваги обох методів і забезпечує комплексну основу для моделювання, аналізу та керування нелінійними мультифізичними системами. Синергія між EMR та СЕФК виникає завдяки їх взаємодоповнюючим ролям у процесі розроблення і дослідження нелінійних систем. EMR дає змогу розділити систему на підсистеми з відповідними обмінами енергії, що є важливим для синтезу керування, а також виконати моделювання. Запис у представленні ПГС дає змогу визначити енергетичні перетворення в системі, а також виділити нероздільні елементи та скоригувати за необхідності EMR модель. Синтезована стійка СЕФК забезпечує керування системою з високими статичними і динамічними показниками. Синтез СЕФК може виконуватися як для всієї системи, так і для її частин. Стратегія керування для СЕФК може бути сформована на основі методу енергетичної оптимізації з використанням підходу лінійної ТДНП. Таким чином, отримана EMR модель СЕФК дає змогу з необхідною точністю симулювати роботу комплексних систем гібридної природи на великих проміжках часу.

Як приклад розглянуто відому EMR привода ET3 на базі СМПМ, що працює в різних режимах. Проте таке представлення є занадто спрощеним і замінює роботу реальної СМПМ еквівалентною роботою ДПС. Для низки досліджень, наприклад, для оцінки енергоефективності ET3 в конкретних умовах транспортного циклу, цього достатньо. Але для інших досліджень, зокрема, коли важлива динаміка приводу, такий підхід не відображає специфіку машини і не дає змогу врахувати її особливості, такі як нелінійності за рахунок насичення, робота в області постійної потужності тощо. В роботі була використана точніша EMR модель векторного керування СМПМ у вигляді взаємопов'язаних

26

блоків накопичення магнітної енергії та перетворення електромагнітної енергії (рис. 27).



Рис. 27. Запропонована модель EMR для СЕФК електропривода на базі СМПМ

Блок "Inverter" моделює роботу без втрат у двофазній системі координат α - β трифазного інвертора напруги, підключеного до джерела постійної напруги v_{DC}. Компоненти вектора вихідної напруги будуть визначатися відповідними значеннями коефіцієнтів модуляції $m_{\alpha\beta}$. Блок " $\alpha\beta$ -dq transformation" виконує пряме для напруг та інверсне для струмів перетворення системи стаціонарних координат α - β в обертові координати d-q відповідно до кута повороту ротора СМПМ в електричних градусах θ_e : Блок "Mechanical part" моделює взаємодію СМПМ з об'єктом привода. Навантажувальний момент T_L формується блоком "Environment". Оскільки у відповідному блоці перетворення енергії "Mechanical part" відбувається накопичення енергії у вигляді кінетичної енергії обертального руху, то блок САК "Closed-loop mechanical inversion" реалізується як регулятор кутової швидкості замкненої системи. Блок "Control Strategy" містить стратегію формування складових струму якоря МТРА. Для точнішого моделювання роботи електромеханічної системи СМПМ з векторним керуванням «Electromechanical multi-input system with non-linear coupled dynamics» використано СЕФК, ФКВ якої реалізуються блоком керування РВС.

Було проведено низку порівняльних досліджень традиційної EMR з інверсним керуванням (IK) EMR-IK та EMR-СЕФК в середовищі MatLab/Simulink, зокрема для привода на базі векторно керованої IPMSM. IK та СЕФК мали тільки пропорційні складові в регуляторах та ФКВ. В EMR-IK складові струму i_d , i_q та електромагнітний момент мали значні статичні похибки, що зумовлювало похибку кутової швидкості ω 1,2% при прикладанні номінального моменту навантаження (рис. 28). Для EMR-СЕФК введення коефіцієнта взаємозв'язку j_{12} дає можливість демпфувати коливання складових струму, і в цьому випадку статичні похибки i_q , T, та ω відсутні. СЕФК також має ширші можливості для формування бажаних динамічних характеристик.

Перевірено можливості використання EMR до складніших систем, зокрема для синтезу системи керування електромагнітними моментами коліс розробленої дводвигунної конфігурації передньопривідного ЕТЗ з електронним диференціалом. На систему керування покладалася також функція кермового керування. Розроблену EMR модель системи представлено на рис. 29.



Рис. 29. ЕМР модель дводвигунної передньопривідної тягової системи ЕТЗ з електронним диференціалом

У блоці "DC source" використана АБ, яка формує бортову мережу живлення напругою $V_{\rm B} = E_{\rm B} - I_{\rm B}R_{\rm B}$, де $E_{\rm B} - {\rm EPC}$ батареї; $I_{\rm B}$ – струм батареї; $R_{\rm B}$ – внутрішній опір батареї. Від напруги батареї живляться системи електроприводів коліс. У моделі це відображено блоком "Current distribution", який розподіляє V_в на два канали живлення DC-DC перетворювачів приводів правого та лівого коліс. Оскільки векторні способи керування за якістю керування наближаються до якості керування напругою ДПС, то в даному дослідженні роботу реальної системи електропривода замінено еквівалентною роботою системи "DC-DC converter – DC motor". Блок "DC-DC converter", який понижує напругу, змодельовано як безінерційний безвтратний регулятор напруги. Блоки "DC motors" складаються з двох пов'язаних підсистем. Перша – елемент накопичення магнітної енергії в обмотці якоря двигуна. Друга – мультифізичний елемент перетворення енергії, що описується відомими рівняннями електромеханічного перетворення в ДПС. Блоки перетворення параметрів механічної енергії "Gearboxes" відображають закономірності ідеальної механічної передачі моментів Т та кутових швидкостей ω від ДПС до коліс ЕТЗ. Блоки "Wheels" відображають закономірності перетворення обертового руху коліс ЕТЗ в поступальний їх рух. В ЕМР блоки "Chassis" розглядають як елементи половини ЕТЗ, які можуть накопичувати енергію, оскільки враховують такий параметр як загальна маса ЕТЗ. На вхід цих підсистем подаються тягові зусилля коліс, які повинні забезпечити потрібні їх кутові швидкості. Фактичні значення цих швидкостей за принципом причинності будуть виходами блоків, що не можуть наростати або спадати миттєво. На других виходах будуть ті ж значення швидкостей, а на других входах – сили, що протидіють рухові. Блок "*Environment*" формує сили опору рухові.

Блоки системи керування позначені світлосинім кольором та розміщені паралельно до відповідних блоків модельованої системи. Усі блоки керування без контролерів побудовані відповідно ІК математичними виразами, оберненими до своїх блоків модельованої системи. Завдання для системи керування формується окремою підсистемою (на рис. 29 не показана), де задаються часові залежності швидкості руху EM $v^*(t)$ та кута повороту $\delta^*(t)$. Блок "Speed distribution" забезпечує розподіл завдання швидкостей між приводами коліс, які поступають на блоки "Closed-loop chassis inversion". Оскільки в блоках "Chassis" має місце накопичення енергії, реалізувати їх пряму інверсію неможливо. Для таких підсистем потрібно реалізувати окремі замкнені контури. В даному випадку це будуть регулятори швидкості правого та лівого коліс ЕМ, які будуються за виразами $F_{r(l)}^* = K_{p,V} \left[v_{r(l)}^*(t) - v_{r(l)}(t) \right] + F_{env}(t)$, де $K_{p,V}$ – коефіцієнт підсилення регуляторів швидкості. На виходах блоків "Closed-loop chassis inversion" формуються завдання на тягові зусилля коліс $F^*_{r(l)}$, які приводи мають розвинути для досягнення заданих швидкостей коліс. За аналогічним принципом будуються замкнені системи регулювання струмів якорів ДПС, оскільки в обмотках якорів відбувається нагромадження енергії магнітного поля. Отож, в блоках "Closedloop motors inversion" реалізовано регулятори струмів ДПС відповідно до рівнянь $V_{\text{DC-DC.r(l)}}^* = K_{p,I} \left[I_{a,r(l)}^*(t) - I_{r(l)}(t) \right] + E_{a,r(l)}(t)$, де $K_{p,I}$ – коефіцієнт підсилення регуляторів струмів. Сформовані на виходах блоків "Closed-loop motors inversion" завдання на вихідні напруги "DC-DC converters" V^{*}_{DC-DC.r(l)} використовуються блоками системи керування "DC-DC converters inversion" для формування потрібних значень коефіцієнтів передачі за напругою "DC-DC converters": $m_{r(l)} = V_{DC-DC,r(l)}^* / V_B$. Блоки оцінки "Steering angle estimation" та "Speed estimation" здійснюють розрахунок, відповідно, отриманого значення кута повороту б та швидкості у ЕМ.

Для дослідження було вибрано ЕТЗ, реалізований на базі шасі автомобіля Audi A2. Комп'ютерну модель досліджуваного ЕТЗ побудовано в середовищі Matlab/Simulink, а результати моделювання представлено на рис. 30.

Як видно з рис. 30, система керування електродвигунами працює точно і величини швидкості v і кута керування δ ЕТЗ співпадають з заданими величинами. Побудована на основі геометрії Ackermann-Jeantaud система керування приводами коліс забезпечує високу точність формування крутного моменту на кожному з коліс та, відповідно, їх швидкість, забезпечуючи повороти ЕТЗ без ковзання коліс, що забезпечує безпеку руху та покращує зносостійкість шин.



Рис. 30. Часові залежності: а) завдання швидкості ЕТЗ і її відпрацювання, б) завдання кута повороту керма і його відпрацювання, в) завдання швидкостей правого і лівого коліс і їх відпрацювання, г) тягові зусилля правого та лівого коліс, д) струми двигунів правого та лівого коліс, е) напруги електродвигунів правого та лівого коліс

Як демонстрацію запропонованого комплексного підходу до синтезу ЕТС на основі енергетичних підходів проведено дослідження електропривода ЕТЗ на базі IPMSM з врахуванням втрат в сталі. Для цього математичний опис об'єкта виконано у вигляді ПГС, застосовано розроблений метод структурного і параметричного синтезу СЕФК, для побудови СЕМ використано результати оптимізації енергоефективності електричної машини на основі ТДНП з множинною лінеаризацією. Все це об'єднано в удосконаленій моделі ЕMR, яка симулює роботу ЕТЗ на основі стандартного транспортного циклу ЕСЕ 15 + EUDC (рис. 31).



Рис. 31. EMR модель привода ET3 на базі IPMSM з врахуванням втрат в сталі



Рис. 32. Енергія втрат в IPMSM протягом транспортного циклу

Це дало змогу дослідити енергетику досліджуваної системи електропривода протягом транспортного циклу для двох варіантів моделювання (рис. 32): моделювання за традиційним (червоний колір) та вдосконаленим (синій колір) методами EMR. Як показали дослідження, уточнене моделювання роботи векторно керованої IPMSM з СЕФК та оптимізацією енергоефективності за врахування втрат в сталі показало зменшення сумарних за транспортний цикл втрати енергії в машині на 5,5%.

ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі вирішено актуальну науково-технічну проблему розвитку методів синтезу керування нелінійними електротехнічними системами на енергетичній основі, що охоплює математичне моделювання систем, їх динамічний синтез, оптимізацію енергоперетворення в усталених режимах, а також комп'ютерне симулювання. Зокрема, для динамічного синтезу систем керування (СЕФК) об'єкти енергоформуючого змодельовані ЯК портгамільтонові системи (ПГС), а для енергетичної оптимізації їх роботи в усталених режимах вони змодельовані як множинно лінеаризовані універсальні перетворювачі потужності (ПП) відповідно до лінійної термодинаміки нерівноважних процесів (ТДНП). При цьому отримані оптимальні координати усталених режимів служать завданням в стратегії енергетичного менеджменту (СЕМ) під час синтезу СЕФК.

Отримані в роботі результати дають можливість зробити такі загальні висновки.

1. Серед систем керування на основі енергетичних підходів позитивно виділяються СЕФК, синтезовані на основі методу IDA-PBC, які набули найбільшого розвитку та забезпечують високі статичні і динамічні показники роботи динамічних систем, асимптотичну їх стійкість і низьку чутливість до параметричних змін.

2. Підхід лінійної ТДНП, зокрема метод універсального опису об'єктів як ПП, дає змогу оцінити енергетичну якість систем з однієї універсальної точки зору без заглиблення у фізичні, хімічні чи інші особливості процесів.

3. Комп'ютерне моделювання за методом EMR є найбільш ефективним для симулювання складних ETC, оскільки в ньому використовується енергетичний підхід за принципом дія – реакція, що дає змогу представити ETC у вигляді взасмопов'язаних блоків з вхідними та вихідними енергетичними змінними, а структуру системи керування просто реалізувати на основі методу інверсії.

4. Запропонований метод структурного синтезу нелінійних СЕФК шляхом внесення додаткових природніх керуючих впливів на непрямоконтрольовані координати дає змогу суттєво розширити регулювальні можливості енергоформуючого керування та реалізовувати необхідні стратегії керування.

5. Метод параметричного синтезу СЕФК, оптимальних за заданим критерієм якості, завдяки формуванню бажаних взаємозв'язків і демпфування в рівнянні Ріккаті дає змогу задавати бажану структуру системи та отримати систему з бажаними показниками якості перехідних процесів. 6. Запропонований підхід до аналізу нелінійних SISO систем на основі лінійної ТДНП дає змогу оцінити ефективність енергоперетворення в системах, а також синтезувати оптимальні з енергетичної точки зору координати їх роботи в усталених режимах, що слугуватимуть завданням для СЕМ під час синтезу СЕФК.

7. Отримані за розробленим на основі лінійної ТДНП методом оптимальні з точки зору максимальної енергетичної ефективності значення d і q складових струму якоря для SPMSM та IPMSM з врахуванням втрат в сталі в усьому діапазоні їх кутових швидкостей дають змогу визначити оптимальні координати керування машини та побудувати необхідну стратегію керування.

8. Дослідження впливу на якість з'єднання двох ПП – VAWT та PMSG – заданого кута зсуву між векторами напруги та струму синхронного генератора в номінальному режимі дало змогу обґрунтувати на основі підходу лінійної ТДНП оптимальне значення цього кута, рівне 40°, за якого забезпечується найкраще наближення до оптимального з'єднання досліджуваних ПП в усьому діапазоні швидкостей вітру, а особливо за середніх та високих вітрів, коли має місце основна генерація електроенергії.

9. Запропонований імпульсний спосіб роботи сонячної автономної водопомпової установки прямого привода дає змогу забезпечити помпування води з максимальною енергетичною ефективністю незалежно від інтенсивності падаючої на фотоелектричні панелі сонячної радіації, що порівняно з аналогічними системами традиційної конфігурації забезпечує на географічній широті Львова збільшення на 64% кількості напомпованої за рік води.

10. Досліджені структури ФКВ для СЕФК гібридними акумуляторносуперконденсаторними системами накопичення енергії дають змогу підібрати оптимальну структуру системи в залежності від поставлених задач та можливостей реалізації.

11. Запропонований метод математичного моделювання на енергетичній основі складних систем, який полягає у поєднанні методу енергетичного макропредставлення та енергоформуючого керування, дає змогу підвищити точність моделювання динамічних процесів в ЕТС з об'єктами різної природи.

12. Отримані результати роботи впроваджено у навчальний процес кафедри ЕКС Національного університету "Львівська політехніка", а розроблені методи синтезу систем керування ЕТС в динамічних та усталених режимах їх роботи використовуються у науково-дослідних роботах НДЛ «СКБ електромеханічних систем» кафедри ЕКС Львівської політехніки, а також в практиці низки підприємств регіону.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Статті у наукових виданнях, що індексується наукометричною базою SCOPUS

1. Biletskyi, Y., & Shchur, I. (2025). Efficiency improvement in standalone solar PV water pumping system by pulsating pump operation based on intermediate supercapacitor buffer. *e-Prime - Advances in Electrical Engineering, Electronics and Energy*, 11, 100913. (Q2) Здобувачем запропоновано, змодельовано та досліджено особливості роботи різних структур та конфігурацій сонячних водопомпових систем.

2. Shchur, I., Biletskyi, Y., & Kopchak, B. (2024). Efficiency Analysis and Optimization of Two-Speed-Region Operation of Permanent Magnet Synchronous Motor Taking into Account Iron Loss Based on Linear Non-Equilibrium Thermodynamics. *Machines*, 12(11), 826. (Q2)

Здобувачем досліджено особливості роботи синхронного двигуна з постійними магнітами під час роботи на різних швидкостях з використанням підходу лінійної нерівноважної термодинаміки.

3. Shchur, I., Lis, M., & Biletskyi, Y. (2023). A non-equilibrium thermodynamic approach for analysis of power conversion efficiency in the wind energy system. *Energies*, 16(13). (Q1)

Здобувачем досліджено особливості роботи вітроенергоустановки як комплескної системи, що складається з перетворювачів потужності, за допомогою підходу лінійної нерівноважної термодинаміки.

4. Lozynskyy, A., Perzynski, T., Kozyra, J., Biletskyi, Y., & Kasha, L. (2021). The interconnection and damping assignment passivity-based control synthesis via the optimal control method for electric vehicle subsystems. *Energies*, 14(12). (Q1)

Здобувачем запропоновано та досліджено метод параметричного синтезу оптимальних систем енергоформуючого керування лінійними та нелінійними об'єктами.

5. Shchur, I., & Biletskyi, Y. (2021). Passivity-based control of water pumping system using BLDC motor drive fed by solar PV array with battery storage system. *Energies*, 14(23). (Q1)

Здобувачем розроблено систему енергоформуючого керування сонячною водопомповою установкою з системою енергетичного менеджменту.

Статті у наукових фахових виданнях України

6. Білецький, Ю. (2024). Ефективності роботи сонячної водопомпової установки на основі термодинамічного аналізу перетворення енергії у відцентровій помпі. *Electrical Power and Electromechanical Systems*, 1(6), 11-24.

Здобувачем досліджено характеристики роботи автономної сонячної установки для помпування води як комплексної системи, що складається з перетворювачів потужності, за допомогою підходу лінійної нерівноважної термодинаміки.

7. Biletskyi, R., Lozynskyy, O., Biletskyi, Y., & Tsyapa, V. (2021). Analysis of Lyapunov matrices' application methods for optimization of stationary dynamic systems. *Електроенергетичні та електромеханічні системи*, 3(1), 1–7.

Здобувачем синтезовано оптимальні системи керування динамічними об'єктами шляхом формування матриці Ляпунова.

8. Shchur, I., Kuzyk, R., & Biletskyi, Y. (2021). Passivity-based control system for stand-alone hybrid electrogenerating complex. *Applied Aspects of Information Technologies*, 4(2), 140–152.

Здобувачем проведено математичне моделювання та дослідження гібридного енергогенеруючого комплексу як гамільтонової системи з керованими портами.

9. Lozynskyy, A., Demkiv, L., Lozynskyy, O., & Biletskyi, Y. (2020). Optimi-

zation of the electromechanical system by formation of a feedback matrix based on state variables. *Електроенергетичні та електромеханічні системи*, 2(1s), 18–26. Здобувачем синтезовано оптимальні системи керування електромеханічними об'єктами шляхом розв'язку рівнянь Ріккаті.

10. Lozynskyy, O., Biletskyi, Y., Lozynskyy, A., Moroz, V., & Kasha, L. (2020). Construction of open-loop electromechanical system fundamental matrix and its application for calculation of state variables transients. *Energy Engineering and Control Systems*, 6(2), 110–119.

Здобувачем досліджено метод аналізу електромеханічних систем шляхом формування фундаментальної матриці.

11. Shchur, I., & Biletskyi, Y. (2020). Improved structure of passivity-based control of battery-supercapacitor hybrid energy storage system. *Applied Aspects of Information Technologies*, 3(4), 232–245.

Здобувачем запропоновано та досліджено нові структури формувачів керуючих впливів енергоформуючих систем керування гібридними акумуляторносуперконденсаторними системами накопичення енергії.

12. Білецький, Ю. О., Кузик, Р. В., & Ломпарт, Ю. В. (2020). Синтез та аналіз системи енергоформуючого керування вітросонячною енергоустановкою з гібридною системою накопиченя енергії. *Електроенергетичні та електромеханічні системи*, 2(1), 8–17.

Здобувачем проведено математичне моделювання та синтез системи керування вітросонячною енергогенеруючою установкою з гібридною системою накопичення як гамільтонової системи з керованими портами

13. Shchur, I., Havdo, I., & Biletskyi, Y. (2020). Modeling of two-motor frontwheel drive control for electric vehicle with electronic differential based on energetic macroscopic representation. *Energy Engineering and Control Systems*, 6(1), 51–60. *Здобувачем проведено математичне моделювання та синтез системи керування електромеханічною системою передньопривідного електромобіля за допомогою макроенергетичного представлення*

14. Lozynskyy, O., Moroz, V., Biletskyi, R., & Biletskyi, Y. (2019). Analytical design of dynamic system regulators taking into account the effect of disturbing factors. *Computational Problems of Electrical Engineering*, 9(1), 21–26.

Здобувачем синтезовано оптимальну систему керування динамічним об'єктом, що враховує зовнішні збурення.

15. Щур, І. З., & Білецький, Ю. О. (2018). Енергоефективне пряме керування моментом у двозонному електроприводі електромобіля на базі синхронної машини з постійними магнітами. Вісник Національного університему "Львівська політехніка". Серія: Електроенергетичні та електромеханічні системи, 900, 57–66.

Здобувачем синтезовано та досліджено енергоефективне пряме керування моментом двозонного електроприводу електромобіля на базі синхронної машини.

16. Білецький, Ю. О., & Білецький, Р. О. (2017). Енергоформуюче керування нелінійними системами на прикладі двозонного електроприводу постійного струму. Вісник Національного університету "Львівська політехніка". Серія: Електроенергетичні та електромеханічні системи, 870, 9–16. Здобувачем синтезовано та досліджено двозонні енергоформуючі системи керування електроприводу постійного струму.

17. Корендій, В. М., Білецький, Ю. О., Дмитерко, П. Р., & Фурдас, Ю. В. (2016). Обґрунтування розвитку та аналіз конструктивних особливостей горизонтально-осьових вітроустановок з лопатями вітрильного типу. Вісник Національного університету "Львівська політехніка". Серія "Динаміка, міцність та проектування машин і приладів, 838, 37–48.

Здобувачем проведено аналіз особливостей систем вітроустановок та можливостей керування ними.

18. Білецький, Ю. О. (2016). Системи енергоформуючого керування синхронною машиною з постійними магнітами як гамільтоновою системою з керованими портами. Вісник Національного університету "Львівська політехніка". Серія: Електроенергетичні та електромеханічні системи, 840, 3–9.

Здобувачем синтезовано та досліджено енергоформуючі системи керування електроприводу на базі синхронної машини з постійними магнітами.

Монографія

19. Щур, І. З., & Білецький, Ю. О. (2018). Енергоформуюче керування нелінійними електромеханічними системами з синхронними машинами на постійних магнітах: монографія. Львів: Видавництво Тараса Сороки, 172 с.

Здобувачем проведено порівняльний аналіз енергоформуючих систем керування, розширено наявні підходи формування взаємоз вязків та демпфування до лінійних та нелінійних систем.

Розділ у колективних монографії

20. Shchur, I., Lozinskyi, A., Kopchak, B., Biletskyi, Y., & Shchur, V. (2018). Passive stall control systems of power limitation modes for vertical axis wind turbines (VAWT). *Lecture Notes in Electrical Engineering*, 452, 131–159.

Здобувачем розроблено систему енергоформуючого керування вітроенергоустановкою з оптимальною швикодією та адаптацією до високих швидкостей вітру.

Наукові праці, які свідчать про апробацію матеріалів дисертації

21. Shchur, I., & Biletskyi, Y. (2020). Energetic microscopic representation (EMR) and passivity-based control of multi-input systems with non-linear coupled dynamics (PMSM control example). *Proceedings of the 25th IEEE International Conference on Problems of Automated Electrodrive: Theory and Practice* (PAEP), 1–6.

22. Kuzyk, R., & Biletskyi, Y. (2019). Energy-shaping control of the windsolar power plant with a hybrid energy storage system. *Proceedings of the 9th International Youth Science Forum "Litteris et Artibus"*, 80–85.

23. Shchur, I., & Biletskyi, Y. (2019). Passivity-based control of hybrid energy storage system with common battery and modular multilevel DC-DC converter-based supercapacitor packs. *Computational Problems of Electrical Engineering: 20th International Conference*, September 15–18, Slavske–Lviv, Ukraine.

24. Shchur, I., & Biletskyi, Y. (2018). Interconnection and damping assignment passivity-based control of semi-active and active battery/supercapacitor hybrid energy storage systems for stand-alone photovoltaic installations. *Advanced Trends in*

Radioelectronics, Telecommunications and Computer Engineering: Proceedings of the 14th International Conference, 210–214.

25. Lompart, Y., & Biletskyi, Y. (2018). Analysis of the feasibility of using an AC motor with new winding type for building electric vehicle. VIII Міжнародний молодіжний науковий форум "Litteris et Artibus" & 13-та Міжнародна конференція "Молоді вчені до викликів сучасної технології", 117–119.

26. Shchur, I., & Biletskyi, Y. (2018). Battery currents limitation in passivitybased controlled battery/supercapacitor hybrid energy storage system. *Electronics and Nanotechnology (ELNANO): Proceedings of the 2018 IEEE 38th International Conference*, 504–510.

27. Shchur, I., & Biletskyi, Y. (2018). Robust passivity-based controllers for fast output voltage regulated, non-ideal DC-DC boost converter in Hamiltonian representation. 2018 3rd IEEE International Conference on Intelligent Energy and Power Systems: Proceedings, 310–315.

28. Luchko, M., & Biletskyi, Y. (2018). Comparative analysis of different types of dynamic solar tracking systems. VIII Міжнародний молодіжний науковий форум "Litteris et Artibus" & 13-та Міжнародна конференція "Молоді вчені до викликів сучасної технології", 115–116.

29. Shchur, I., & Biletskyi, Y., Holovach, I. (2017). Improving of IDA-PBC systems by forming additional regulatory actions on directly uncontrollable system loops. *First IEEE Ukraine Conference on Electrical and Computer Engineering UKRCON-2017: Proceedings*, 504–507.

30. Biletskyi, R., & Biletskyi, Y. (2017). Nonlinearity compensation for twozone energy-shaping control systems of DC drive. *Litteris et Artibus: VII International Youth Science Forum*, 164–166.

31. Shchur, I., Biletskyi, Y., & Shchur, V. (2017). Energy efficient and simple control of stand-alone combine heat-power generation small wind turbine. *First IEEE Ukraine Conference on Electrical and Computer Engineering UKRCON-2017: Proceedings*, 483–488.

32. Biletskyi, R., & Biletskyi, Y. (2016). Control systems for DC motor as port-controlled Hamiltonian system. *Litteris et Artibus: VI International Youth Science Forum*, 197–198.

33. Biletskyi, Y. (2015). Control systems of permanent magnet synchronous machine as port-controlled Hamiltonian system. *Litteris et Artibus: V International Youth Science Forum*, 194–195.

АНОТАЦІЯ

Білецький Ю.О. Розвиток методів синтезу нелінійних електротехнічних систем на енергетичній основі. – *Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису*.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.09.03 – *Електротехнічні комплекси та системи*. – Національний університет «Львівська політехніка» Міністерства освіти і науки України, Львів, 2025. Дисертаційна робота присвячена розв'язанню актуальної науковоїтехнічної проблеми в галузі електротехніки, яка полягає в розвитку методів синтезу керування нелінійними електротехнічними системами на енергетичній основі і поєднанню їх в комплексний підхід, що охоплює математичне моделювання систем, їх динамічний синтез, оптимізацію енергоперетворень в усталених режимах та комп'ютерне моделювання.

Запропоновано процедури синтезу систем енергоформуючого керування (СЕФК), які дають змогу передавати керуючі впливи на бажані фізично неконтрольовані координати стану через контрольовані контури системи, і, таким чином, розширити можливості керування в СЕФК. Розроблено комп'ютерну програму для їх реалізації до різних об'єктів. Результати синтезу успішно випробувано на прикладі електропривода на базі двигуна постійного струму (ДПС). Запропонована процедура синтезу СЕФК з корекцією сигналів завдання є особливо перспективною для складних систем, оскільки дає змогу синтезувати СЕФК із широкими можливостями регулювання, високими статичними і динамічними характеристиками, стабільною роботою керованих систем для широкого діапазону завдань робочих координат стану та простою імплементацією.

Розроблено метод параметричного синтезу СЕФК для лінійних та нелінійних систем на основі теорії оптимального керування та модифікованого рівняння Ріккаті, що дає можливість знайти структуру та параметри матриць демпфування та взаємозв'язків виходячи з обраного критерію оптимальності.

Розвинуто в напрямку застосування до нелінійних систем підхід лінійної термодинаміки нерівноважних процесів (ТДНП), а саме метод універсального опису об'єктів як перетворювачів потужності (ПП), для аналізу енергетичних процесів та покращення їх ефективності в ЕТС, зокрема до тих, які включають підсистеми різної природи. Для синхронної машини з постійними магнітами (СМПМ) з урахуванням втрат в сталі одержано таким чином її математичну модель як множину універсальних ПП для кожної робочої точки машини та сформовано на цій основі карти її енергетичної ефективності, які можна використовувати як стратегію керування під час синтезу СЕФК. Вперше описано та проаналізовано вітроенергоустановку (ВЕУ) у вигляді вітротурбіни та синхронного генератора з постійними магнітами як двох каскадно з'єднаних множин ПП. Це дало змогу виявити нові аспекти енергетики цієї системи та її елементів, а також шляхи підвищення її ефективності. Моделювання та дослідження сонячної установки для помпування води (СУПВ) з відцентровою помпою (ВП) показали доцільність зміни проєктного для конкретної СУПВ значення продуктивності ВП у сторону збільшення з метою підвищення енергетичної ефективності роботи ВП та розширення діапазону робочих значень інтенсивності сонячної радіації, що забезпечить збільшення річної водяної продуктивності автономних СУПВ прямого привода.

Для SISO систем зі складною нелінійною динамікою, до яких застосовується СЕФК, представлений метод опису систем як універсальних ПП на основі лінійної ТДНП дає змогу отримати оптимальні координати та сформувати стратегію енергетичного менеджменту. Крім цього, за принципом СЕФК ефективно реалізовуються необхідні стратегії керування нелінійними та мультифізичними системами, зокрема MISO та MIMO, низка яких розглянута і досліджена в роботі.

Для нелінійної ЕТС на базі ДПС незалежного збудження з двозонним регулюванням швидкості розроблено СЕФК згідно запропонованої процедури синтезу з корекцією сигналів завдання, що забезпечує стійкість системи та високі статичні і динамічні показними роботи.

На основі розробленого методу запропоновано та досліджено, зокрема експериментально, різні варіанти СЕФК для гібридних акумуляторносуперконденсатоних систем нагромадження енергії (ГСНЕ) різної конфігурації для сонячної енергоустановки та електромобіля, які забезпечують задану стратегію керування. Отримані СЕФК подовжують роботу акумуляторної батареї завдяки зменшенню динаміки зміни струму та його обмеженню. Розроблено також СЕФК що може працювати в широкому діапазоні навантажень завдяки ковзному перемиканню синтезованих регуляторів, які мають різну структуру, відповідно до потреби обмеження струму. Вперше розроблено СФЕК для ГСНЕ з багаторівневим модулем суперконденсаторів (СК), інтегрованим з каскадним DC-DC перетворювачем, що дає змогу реалізувати стратегії енергетичного менеджменту і водночас потребує у вісім разів менше параметрів для налаштування порівняно з існуючими системами, побудованими за класичними підходами. Розроблено СЕФК для енергозберігаючої СУПВ з додатковими функціями накопичення виробленої електроенергії та живлення зовнішніх електричних споживачів, що забезпечується відповідною стратегією керування.

Запропоновано пульсуючий режим роботи автономної СУПВ прямого привода з введенням в канал потоку енергії проміжного СК буфера, що забезпечує номінальне значення енергетичної ефективності роботи ВП за зміни в широких межах інтенсивності сонячної радіації. Ефективність такої кофігурації підтверджена фізичними експериментами. У випадку географічної широти м. Львова отримано підвищення річної продуктивності дослідної СУПВ на 64% порівняно з СУПВ традиційної конфігурації.

Запропоновано поєднати підхід до комп'ютерного моделювання за методом макроенергетичного представлення (EMR), що дає змогу моделювати складні мультифізичні системи, з СЕФК з метою покращення точності моделювання та керування. Це підтверджено на прикладі EMR дослідження СЕФК привода електромобіля на базі векторно керованої СМПМ, де електромагнітна частина СМПМ є підсистемою з багатьма входами та нелінійною зв'язаною динамікою.

Практична значущість роботи підтверджена актами впровадження у виробничий і навчальний процеси.

Ключові слова: електротехнічні системи, енергетичні підходи, енергоформуюче керування, структурно-параметричний синтез, оптимальне керування, лінійна термодинаміка нерівноважних процесів, макроенергетичне представлення, відновлювана енергетика, помпування води, привод електромобіля, системи нагромадження енергії, синхронна машина з постійними магнітами.

ABSTRACT

Biletskyi Y.O. Development of methods for the synthesis of nonlinear electrical systems on an energy basis. – *Qualifying scientific work on manuscript rights*.

Dissertation for obtaining the scientific degree of Doctor of Technical Sciences (Doctor of Science), specialty 05.09.03 – "*Electrotechnical complexes and systems*". – Lviv Polytechnic National University, Ministry of Education and Science of Ukraine, Lviv, 2025.

The dissertation is devoted to the solution of a pressing scientific and-technical problem in the field of electrical engineering, which consists of developing energybased approaches for control synthesis in nonlinear multiphysical electrical systems and combining them into a comprehensive approach that includes system mathematical modelling, their dynamic synthesis, optimisation of energy conversions in steady-state modes, and computer modelling.

Procedures of an energy-shaping control system (ESCS) synthesis, which expand ESCS control capabilities, are proposed with respective computer program. A method for ESCS parametric synthesis for linear and nonlinear systems based on the theory of optimal control and the modified Riccati equation has been developed. ESCS were successfully designed for PMSM, DCM, DC-DC converter, TM and different HESS systems. The approach of linear thermodynamics of non-equilibrium processes (LTNP) has been developed to analyse energy processes and improve their efficiency. It was successfully used for SPMSM, IPMSM, WPS, WECS and respective design recommendations or control strategies were received. As ESCS principle effectively implements the defined control strategies for nonlinear and multiphysics systems these approaches were combined. A pulsating mode for autonomous directdriven SWPS operation with the injection of an intermediate SC buffer into the energy flow channel that boosts productivity by 64% is proposed. The proposed combination of energetic macroscopic representation (EMR) and ESCS method improves the accuracy of modelling and control.

The practical significance of the work is confirmed by acts of implementation in production and educational processes.

Keywords: electrotechnical systems, energy-based approaches, energy-shaping control, structural-parametric synthesis, optimal control, linear thermodynamics of non-equilibrium processes, energetic macroscopic representation, renewable energy, water pumping, electric vehicles, energy storage systems, permanent magnet synchronous machine.