

ВІДГУК

офіційного опонента на дисертаційну роботу

Клен Катерини Сергіївни

на тему «Теоретичні засади побудови систем керування перетворювачами на базі ентропійної дивергенції»,

представлену на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.09.12 – напівпровідникові перетворювачі електроенергії

1. Актуальність теми дисертації.

Розвиток альтернативної енергетики є одним з перспективних шляхів подолання сучасних проблем та викликів, що стоять перед людством протягом останніх десятиріч в частині забезпечення енергоресурсами. Обмежені запаси традиційних енергоносіїв, великий шкідливий вплив на оточуюче середовище, що спричиняють як їх видобуток так і використання, змушують шукати інші, альтернативні джерела енергії. Але головною перешкодою розвитку альтернативних напрямків енергетики є їх суттєво менша рентабельність внаслідок низької щільності енергії первинних альтернативних джерел. Тому головним завданням, яке стоїть перед інженерами та науковцями, що зайняті у створенні енергосистем на базі альтернативних джерел енергії, є підвищення їх економічної ефективності. Значною мірою це завдання покладається на силову електроніку, не тільки на схемотехнічні та конструктивні рішення та елементну базу, а і на алгоритми керування цими системами. Головною особливістю більшості альтернативних джерел енергії є їх стохастичний характер. З іншого боку, стохастичний характер має і споживання енергії. Узгодження цих потоків забезпечується застосуванням накопичувачів енергії. Однак вони мають обмежену ємність, внаслідок суттєвих капітальних та експлуатаційних витрат, що не дозволяє забезпечити стовідсоткове узгодження генерування та споживання. В цих обставинах, з точки зору забезпечення енергоефективності, на перший план виходять оптимальні алгоритми керування потоками енергії в системі за допомогою напівпровідникових перетворювачів. Представлена дисертаційна робота присвячена саме розробці таких алгоритмів, тому її можна вважати актуальною.

2. Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.

Дисертаційна робота виконана на кафедрі електронних пристроїв та систем Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» за темами, які фінансувалися: Міністерством освіти і науки України: «Теоретичні засади обробки дискретних функцій з модульним аргументом та використання їх для моніторингу біотелеметричних показників людини в надзвичайних ситуаціях» (№ ДР 0115U000352, 2017 – 2018 рр.); «Розробка неінвазивної пасивної акустичної системи нового покоління для вимірювання критичних фізіологічних параметрів головного мозку та внутрішнього вуха людини» (№ ДР 0118U003533, 2018 – 2019 рр.), «Система енергозабезпечення високочастотних вентиляно-індукторних двигунів дрона з багатокомірковими перетворювачами і просторово-часовою модуляцією» (№ ДР 0120U102131, 2020 – 2021 рр.); за рахунок зовнішнього інструменту допомоги Європейського Союзу для виконання зобов'язань України у Рамковій програмі Європейського Союзу з наукових досліджень та інновацій “Горизонт 2020”: «Smart-моніторинг ефективності функціонування локальних систем енергозабезпечення з альтернативними джерелами енергії» (№ ДР 0123U102848, 2023 – 2024 рр.).

3. Ступінь обґрунтованості наукових положень, висновків та рекомендацій, сформульованих у дисертації та їх достовірність.

Обґрунтованість та достовірність отриманих результатів дисертаційної роботи Клен К.С. підтверджується коректністю основних припущень і положень, що були покладені в основу наукових досліджень.

Обґрунтованість та достовірність наукових положень не викликає сумнівів, результати викладено за належною аргументацією, із наданням посилань на відповідні джерела.

Обґрунтованість досліджень, сформульованих у дисертаційній роботі висновків і рекомендацій, досягнуто за рахунок коректного використання загально-апробованих методів досліджень, а саме: математичних основ теорії

ортогональних функцій; методів ентропійного і фрактального аналізу; теорії мартингалів; теорії моментів. Дослідження були виконані з використанням математичного моделювання із застосуванням комп'ютерних моделей у середовищі Matlab Simulink.

4. Структура та зміст дисертації.

Дисертаційна робота складається з анотації двома мовами, вступу, 6 розділів, висновків, списку використаних джерел та додатків.

Обсяг дисертації становить 396 сторінок, у тому числі 244 сторінки основного тексту, 129 рисунків, 41 таблиця, 235 найменувань використаних джерел, що відповідає чинним вимогам до докторських дисертацій.

Структура дисертації цілком узгоджується з її назвою, метою і завданнями дослідження.

У вступі обґрунтовано актуальність теми роботи, сформульовано мету і задачі наукового дослідження, наведено зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами, вказано об'єкт та предмет дослідження, перелічено методи досліджень. Викладено наукову новизну і практичне значення отриманих результатів, зазначено особистий внесок здобувача, відомості про апробацію результатів роботи, публікації за темою досліджень, структуру та обсяг дисертації.

У першому розділі наведено приклад структурної схеми локальної системи електроживлення, показані особливості побудови та режими роботи локальних систем електроживлення на базі відновлюваних джерел енергії.

В розділі зроблено обґрунтування задач, вирішення яких дозволяє реалізувати енергоефективне керування перетворювачами у локальних системах електроживлення.

Вказується, що при розробці алгоритмів енергоефективного керування локальними системами електроживлення, процесами генерації, накопичення та споживання електричної енергії в них, потрібно застосовувати комплексний

підхід, з урахуванням значної розмірності простору даних, різномірності їх потоків та необхідністю забезпечення гарантованого електроживлення навантаження.

Також у розділі, на підставі аналізу процесів генерації, споживання та накопичення енергії у локальній системі електроживлення, було виділено основні задачі, виконання яких має забезпечувати загальна система керування.

Другий розділ роботи присвячено математичному моделюванню структури потоків первинної енергії.

У розділі розкривається зміст підходу застосування аналогу принципу невизначеності Гейзенберга до локальних систем електроживлення. Він формулюється як принципова неможливість, на обраному інтервалі спостереження, одночасно з мінімальною похибкою, визначати положення: робочої точки на зовнішній характеристиці відновлюваного джерела енергії для забезпечення роботи в режимі відбору максимальної енергії, та середнього значення енергії, для забезпечення ефективної роботи накопичувача.

Також зазначається, що для забезпечення ефективної роботи системи необхідно визначати тривалість інтервалу спостереження та кількість інтервалів спостереження на базовому інтервалі для реалізації двоінтервального керування при зміні потоку первинної енергії, як за відбором максимальної енергії від установок на основі відновлюваних джерел, так і за реалізацією раціонального використання енергії накопичувача. При побудові ефективних алгоритмів керування перетворювачами локальних систем виникає необхідність попередньої оцінки рівнів вихідної потужності установок на основі відновлюваних джерел енергії та навантаження за умови зміни потоків первинної енергії.

Врахування аналогу принципу невизначеності Гейзенберга, при керуванні локальною системою електроживлення, вказує на необхідність аналізу як базового, так і мінімального інтервалів спостереження для визначення положення робочої точки.

При реалізації оптимальних алгоритмів керування параметри потоків первинної енергії, таких як інтенсивність випромінювання та швидкість вітру,

можна визначати опосередковано на основі супровідних даних про температуру, тиск та вологість повітря, шляхом застосування кореляційного аналізу. Підвищення точності прогнозування може бути досягнуто шляхом врахування фрактальної природи процесів генерації та споживання енергії у часі.

Третій розділ роботи присвячено особливостям керування перетворювачами локальних систем електроживлення на основі розрахунку статистичних характеристик розподілів вхідних та вихідних потоків енергії системи. Для оцінки відхилення даних розподілів амплітуд потужності на виході сонячних батарей та параметрів навколишнього середовища від ідеальних, використано першу вибірку ентропії.

Використання першої вибіркової ентропії, як інтегральної характеристики стану системи у реалізації прогнозного керування локальною системою електроживлення, дає змогу оцінювати та порівнювати випадкові процеси генерації, споживання та накопичення енергії, не знаходячи законів їх розподілу.

Ефективність роботи локальної системи електроживлення забезпечується підтримкою балансів «носіїв», «ресурсів» та енергії у кожному конкретний момент часу, з врахуванням того, що в локальній системі електроживлення з довільною кількістю джерел та навантажень розподіл як ресурсів генерації, так і ресурсів споживання є змінною величиною.

Для підтвердження результатів теоретичних досліджень було здійснено моделювання роботи системи за допомогою математичної моделі, що складається з моделей установки на основі відновлюваного джерела енергії, накопичувача з зарядно-розрядним пристроєм та навантаження.

У четвертому розділі наведено особливості розрахунку ентропійної дивергенції з врахуванням впливу подвійної структури потоків енергії генерації та споживання.

При формуванні струму у вихідному колі відновлюваного джерела енергії необхідно реалізувати упереджувальне керування потужністю на виході системи в наступний момент часу.

Виконання умови відбору максимальної енергії від відновлюваного джерела, при різних значеннях опору навантаження, забезпечується шляхом керування зарядним струмом накопичувача.

Потужність на виході установки на основі відновлюваного джерела енергії вважають випадковою функцією з певним набором випадкових реалізацій та статистичними характеристиками, які залежать від часу.

Реалізація запропонованого розрахунку у алгоритмі керування струмом у вихідному колі відновлюваного джерела енергії дає можливість забезпечити відбір максимальної енергії з визначеними математичним сподіванням та дисперсією. Коли потужність навантаження також є випадковою функцією, з певним набором випадкових реалізацій, необхідно враховувати сумісний вплив двох випадкових функцій та визначати їх статистичні характеристики. Математичне сподівання суми двох випадкових функцій потужності на виході відновлюваного джерела енергії та навантаження визначається як сума математичних сподівань кожної функції, а дисперсія, як сума їх дисперсій та подвоєного кореляційного моменту.

Для реалізації ефективного прогностного керування необхідно, на основі прогнозу вихідної потужності системи, визначати рівень надлишкової або недостатньої енергії для заряду або розряду накопичувача.

У п'ятому розділі описано спосіб керування накопичувачем у локальній системі електроживлення на основі розрахунку різниці ентропійних дивергенцій з боку джерела та навантаження. Наведені функціональна схема системи керування накопичувачем, блок-схема алгоритму керування комутатором зарядно-розрядного пристрою накопичувача та часові діаграми, отримані за допомогою математичного моделювання, що демонструють реалізацію запропонованого алгоритму.

Для підвищення ефективності роботи накопичувача, з точки зору зменшення інтервалів часу повністю зарядженого або розрядженого стану, в системі керування пристроєм, сигнал керування ключем, що комутує накопичувач, формується відповідно до алгебраїчної різниці між значеннями ентропійної дивергенції потоку енергії на виході установки на базі

відновлюваного джерела енергії та значеннями ентропійної дивергенції потоку енергії, що споживається навантаженням. Ентропійна дивергенція, як зі сторони установки, так і зі сторони навантаження, розраховується як статистична відстань між заданим та поточним розподілами потоків генерації та споживання.

Шостий розділ роботи присвячений перспективам використання запропонованих теоретичних засад оптимального керування процесами генерації, накопичення та споживання енергії у локальних системах електроживлення на базі відновлюваних джерел енергії.

Вказується, що запропоновані теоретичні підходи виділяють у логіці побудови загального керування, п'ять рівнів ієрархії: рівень централізованого керування; рівень централізованого, децентралізованого керування; рівень контекстно-залежного керування; рівень контекстно-залежного керування (великі данні), рівень преємптивного керування. Кожен з цих рівнів має свою стратегію та об'єкт керування.

В розділі вказується, що використання установок на основі відновлюваних джерел енергії потребує модернізації інфраструктури існуючих систем електроживлення. Пропонується зробити об'єднання електротехнічного обладнання в єдину систему, що здійснюється на енергетичному рівні за допомогою перетворювачів електричної енергії, а на інформаційному рівні шляхом обміну інформацією, яку використовують для керування локальною системою електроживлення і представляють у формі контексту.

Висновки, що зроблені за проведеними Клен К.С. дослідженнями, охоплюють весь обсяг отриманих результатів і є достовірними. У висновках сформульовані результати дослідження, які дозволили оцінити вклад автора дисертаційної роботи в подальший розвиток теоретичних засад керування напівпровідниковими перетворювачами, заснованих на аналогові принципу невизначеності Гейзенберга, ентропійному аналізі потоків первинної енергії та енергії споживання з врахуванням їх подвійної структури та фрактальної природи.

5. Наукова новизна результатів дисертаційного дослідження не викликає сумнівів і полягає в наступному:

1. Вперше запропоновано метод інтервального керування перетворювачами локальної системи електроживлення на основі врахування аналогу принципу невизначеності Гейзенберга, що дозволило в 2 рази зменшити кількість інтервалів спостереження, на кожному з яких забезпечується відбір максимальної енергії від установок на основі відновлюваних джерел.

2. Вперше розроблено метод прогнозування потужності генерації сонячних батарей на основі об'єднання методів найближчих сусідів та кластеризації k-середніх, що дозволяє зменшити середню абсолютну похибку прогнозування до 4%.

3. Вперше розроблено метод керування перетворювачами для розподілу енергії між накопичувачами та навантаженням у локальних системах електроживлення з установками на основі відновлюваних джерел енергії на основі розрахунку ентропійної дивергенції, що дозволило на 3% підвищити ефективність використання енергії первинного потоку в системі.

4. Вперше доведено, що врахування фрактальної природи процесів генерації та споживання енергії при розрахунку імовірнісних моментів при прогнозуванні часового розподілу ентропії Шеннона та Реньї дозволяє на 11% підвищити точність прогнозування потужності споживання.

6. Практичне значення роботи полягає в наступному:

1. На основі теорії моментів розроблено алгоритм прогнозування та відновлення часового розподілу потужності споживання на основі розрахунку ентропії Шеннона та Реньї з підвищеною точністю.

2. Створено новий спосіб керування зарядно-розрядним пристроєм накопичувача у локальних системах з установками на основі відновлюваних джерел енергії на основі визначення різниці ентропійних дивергенцій зі сторони джерела та навантаження, що дозволяє щонайменше у 2 рази зменшити

тривалості інтервалів часу, коли накопичувач є повністю зарядженим або розрядженим.

3. На основі теорії мартингалів розроблено алгоритм оцінювання кількості енергії, яка може виявитись надмірною при заряді накопичувача та кількості енергії, що може виявитись недостатньою при його розряді, що дозволяє визначити ймовірності перезаряду та надмірного розряду накопичувача за умови відсутності BMS-системи.

4. Розроблено алгоритм та програмну реалізацію розрахунку та формування керуючих імпульсів зарядно-розрядного пристрою накопичувача в локальній системі електроживлення з установкою на основі відновлюваного джерела енергії.

Отримані результати є теоретичною базою для створення ефективних систем керування перетворювачами у локальних системах електроживлення.

Слід також зазначити, що результати роботи використано для вдосконалення програми прогнозування генерації електричної енергії сонячними фотоелектричними станціями ТОВ «Пролог Соларінвест» та ТОВ «Енерджилайн» та для створення методик і рекомендацій щодо підвищення ефективності використання електроенергії в системах з установками на основі відновлюваних джерел енергії громадською організацією «Асоціація науковців України».

Матеріали дисертації впроваджено в навчальний процес у Національному технічному університеті України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського».

Впровадження перелічених наукових результатів для практичного застосування підтверджується відповідними актами, наведеними у Додатку Д.

7. Оприлюднення результатів дисертаційної роботи. Повнота викладення основних положень дисертації в наукових працях.

Результати дисертаційної роботи опубліковано у 36 наукових працях, у тому числі: 1 монографії, 32 статтях у наукових фахових виданнях (з них 3

статті у виданнях іноземних держав, 5 статей у виданнях України, які включені до міжнародних наукометричних баз Scopus та Web of Science, 3 статті одноосібно), 3 тезах доповідей в збірниках матеріалів конференцій. У даних публікаціях на високому науковому рівні повністю висвітлені результати дисертаційного дослідження. Внесок автора в роботи, що були опубліковані у співавторстві, конкретизовано у рефераті та у Додатку А дисертації.

Також результати дисертації пройшли апробацію на наукових семінарах «Напівпровідникові перетворювачі в пристроях промислової електроніки» секції «Перетворення параметрів електричної енергії» НАН України (м. Київ, 2020 – 2022 рр.); міжнародних науково-технічних конференціях: «Проблеми сучасної електротехніки (м. Київ, 2018, 2020 рр.), «Smart-технології в енергетиці та електроніці» (м. Лазурне, 2017 – 2021 рр.), «IEEE International Conference on Electronics and Nanotechnology», ELNANO (м. Київ, 2022 р.), «IEEE International Conference on Information and Telecommunication Technologies and Radio Electronics», UkrMiCo (м. Київ, 2023 р.), International conference Generacja-Przesył- Wykorzystanie GPW (м. Вроцлав, 2017 – 2023 рр.).

8. Мова та стиль дисертації.

Дисертація написана державною мовою, загалом грамотно і зрозуміло. Виклад матеріалу в роботі має логічну послідовність, наукова термінологія є загальноновизнаною, розділи взаємопов'язані та цілком розкривають поставлену мету, стиль викладення результатів досліджень, нових наукових положень та висновків забезпечує доступність їх сприйняття. Результати проілюстровані рисунками, графіками та фотоматеріалами.

9. Відповідність реферату текстові дисертації. Реферат достатньою мірою відображає зміст роботи. Основні наукові положення та висновки дисертаційної роботи ідентичні наведеним у рефераті. Зміст реферату базується на тексті дисертації.

10. Відповідність теми і змісту дисертації паспорту спеціальності, за якою вона подана на захист. Тема дисертації та її зміст відповідають паспорту спеціальності 05.09.12 – напівпровідникові перетворювачі електроенергії.

11. Недоліки та зауваження до дисертаційної роботи.

1. У формулюванні об'єкту дослідження фігурує «відновлювані джерела енергії», як загальне поняття. В дисертаційній роботі, в якості первинних відновлюваних джерел енергії, розглянуті тільки сонячна та вітрова. Але перелік відновлюваних джерел енергії є більш широким.

2. Дисертаційна робота присвячена проблемі синтезу оптимальних алгоритмів керування локальними системами електроживлення. На мою думку в роботі не вистачає формалізованого визначення загального критерію ефективності роботи системи, який би давав можливість оцінити загальну ефективність запропонованих алгоритмів керування.

3. У тексті дисертації (стор. 66) та реферату (стор. 6) вказується: *«На підставі аналізу процесів генерації, споживання та накопичення енергії, що протікають у локальній системі електроживлення, можна виділити наступні основні задачі, виконання яких має забезпечувати загальна система керування: ...»* серед яких: п.2: **«Розробка алгоритмів керування перетворювачами у локальних системах електроживлення за флуктуаціями, що відповідають Вінеровському процесу»** та п.5: **«Розробка алгоритмів прогностного керування перетворювачами з врахуванням фрактальної природи процесів генерації та споживання енергії»**. Тобто, за цим формулюванням, система керування повинна забезпечувати **розробку** алгоритмів керування, що, на мою думку, не є логічним.

4. На рисунку 1.13 (а) дисертації (стор. 46) та рисунку 1 автореферату (стор. 6) у вузлі, що поєднує загальний потік енергії від джерел енергії та заряд-

розрядного пристрою потік енергії від заряд-розрядного пристрою має односпрямований характер (тільки розряд).

5. На рисунку 1.13 (а) дисертації (стор. 46) та рисунку 1 автореферату (стор. 6) розташування датчику потужності (ДП) не дозволяє йому виконувати свої функції з причини недоступності інформації про струм навантаження.

6. Реалізація алгоритмів оптимального відбору потужності вітротурбіни в багатьох випадках потребує наявності інформації про значення швидкості вітрового потоку від відповідного датчика. На рисунку 1.13 (а) дисертації (стор. 46) та рисунку 1 автореферату (стор. 6) цей канал інформації відсутній.

7. Позначення у деяких малюнках дисертації та реферату мають дуже маленькі розміри, що ускладнює сприйняття змісту.

8. Нумерація рисунків «4.6» на стор. 223 та на стор. 228 та відповідні посилання у тексті дисертації співпадають.

Висловлені зауваження не є визначальними і не зменшують загальну наукову новизну та практичну значимість результатів та не впливають на позитивну оцінку дисертаційної роботи.

12. Висновок про дисертаційну роботу.

Дисертаційна робота Клен Катерини Сергіївни на тему «Теоретичні засади побудови систем керування перетворювачами на базі ентропійної дивергенції» виконана на високому науковому рівні, не порушує принципів академічної доброчесності та є закінченим науковим дослідженням, сукупність теоретичних та практичних результатів якого вирішує важливу науково-прикладну проблему підвищення ефективності використання енергії у локальних системах електроживлення на базі відновлюваних джерел енергії на основі розробки теоретичних засад керування напівпровідниковими перетворювачами, заснованих на аналогові принципу невизначеності Гейзенберга, ентропійному аналізі потоків первинної енергії та енергії споживання з врахуванням їх подвійної структури та фрактальної природи. За актуальністю, науковою новизною, практичною цінністю, оформленням та змістом дисертаційна робота

повністю відповідає вимогам пп. 7, 8, 9 «Порядку присудження та позбавлення наукового ступеня доктора наук», затвердженого постановою Кабінету Міністрів України від 17 листопада 2021 р. №1197, а її автор Клен Катерина Сергіївна заслуговує на присудження наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.09.12 – напівпровідникові перетворювачі електроенергії.

Офіційний опонент:

Професор кафедри електроніки,
інформаційних систем та програмного забезпечення
Інженерного навчально-наукового інституту ім. Ю.М. Потебні
Запорізького національного університету,

д.т.н., доц.



Дмитро АЛЕКСІЄВСЬКИЙ

« 25 » 04 20 25 року

Підпис
засвідчую

НАЧАЛЬНИК
ВІДДІЛУ КАДРІВ



Алексієвського Д.
Потебні