

ВІДГУК**офіційного опонента**

на дисертаційну роботу Клен Катерини Сергіївни
«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.

Актуальність теми дисертації.

Ефективність є одним з п'яти основних критеріїв у відповідності до яких проводиться розробка будь-якої радіоелектронної апаратури, в т.ч. і напівпровідникових перетворювачів електроенергії. Тому будь-які дослідження, що стосуються підвищення ефективності, завжди будуть актуальними. Але в даному випадку ефективність є особливо важливою оскільки:

- дослідження стосуються енергетичних систем з установками на основі відновлюваних джерел енергії, задіяних в процесах генерації та передачі електроенергії;

- дослідження направлені на оптимізацію часових режимів роботи складових таких систем за критерієм ефективності;

- частка локальних систем електроживлення з установками на основі відновлюваних джерел енергії в системі енергопостачання невинне зростає.

Як правило, дослідження, направлені на досягнення максимальної ефективності систем електроживлення з установками на основі відновлюваних джерел енергії, стосуються в першу чергу забезпечення максимального відбору енергії на вході системи. Але навіть повноцінне вирішення цієї задачі і використання в локальних систем електроживлення з установками на основі відновлюваних джерел енергії найсучасніших напівпровідникових перетворювачів електроенергії з найвищим коефіцієнтом корисної дії, не гарантують максимальну ефективність системи в цілому. Оскільки вона визначається в значній мірі режимами роботи складових системи в плані тривалості часових інтервалів, пов'язаних з перетоками електроенергії. Тому вимагає вирішення задача підвищення ефективності таких систем за рахунок створення та впровадження інтелектуальних механізмів керування розподіленими енергетичними ресурсами та їх системної інтеграції з використанням накопичувачів електричної енергії.

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

Дослідження за темою дисертаційної роботи виконувалися на кафедрі електронних пристроїв та систем Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» за темами, які фінансувалися як Міністерством освіти і науки України, так і за рахунок зовнішнього інструменту допомоги Європейського Союзу для виконання

зобов'язань України у Рамковій програмі Європейського Союзу з наукових досліджень та інновацій “Горизонт 2020”:

1) НДР «Теоретичні засади обробки дискретних функцій з модульним аргументом та використання їх для моніторингу біотелеметричних показників людини в надзвичайних ситуаціях» (№ ДР 0115U000352, 2017 – 2018 рр., МОН України);

2) НДР «Розробка неінвазивної пасивної акустичної системи нового покоління для вимірювання критичних фізіологічних параметрів головного мозку та внутрішнього вуха людини» (№ ДР 0118U003533, 2018 – 2019 рр., МОН України);

3) НДР «Система енергозабезпечення високочастотних вентильно-індукторних двигунів дрона з багатокомірковими перетворювачами і просторово-часовою модуляцією» (№ ДР 0120U102131, 2020 – 2021 рр., МОН України);

4) НДР «Smart-моніторинг ефективності функціонування локальних систем енергозабезпечення з альтернативними джерелами енергії» (№ ДР 0123U102848, 2023 – 2024 рр., “Горизонт 2020”).

Автор була виконавцем перелічених науково-дослідних робіт, в рамках виконання яких нею зроблено обґрунтування задач дослідження та розроблено теоретичні основи енергоефективного керування перетворювачами у системах електроживлення.

Мета роботи, методи досліджень.

Метою дисертаційної роботи є розробка теоретичних засад керування напівпровідниковими перетворювачами, заснованих на аналогові принципи невизначеності Гейзенберга, ентропійному аналізу потоків енергії генерації та споживання з врахуванням їх подвійної структури та фрактальної природи, для вирішення проблеми підвищення ефективності використання енергії у локальних системах електроживлення з установками на основі відновлюваних джерел енергії.

Об'єктом дослідження є процеси перетворення енергії у локальних системах електроживлення з установками на основі відновлюваних джерел енергії.

Предметом дослідження є режимні параметри роботи систем керування напівпровідниковими перетворювачами у локальних системах електроживлення.

Методи досліджень. При вирішенні поставлених в дисертаційній роботі завдань використано математичні основи теорії ортогональних функцій для апроксимації та відновлення даних потужності генерації та споживання; ентропійний та фрактальний аналіз, теорію мартингалів для керування накопичувачем в системах електроживлення; теорію моментів для прогнозування електроспоживання. Комп'ютерне моделювання з використанням експериментальних даних проводилось у середовищі Matlab Simulink.

Наукова новизна результатів.

Офіційний опонент погоджується з основними положеннями наукової новизни представленої докторської дисертації.

Основні наукові положення, висновки та рекомендації відповідають меті дисертації та поставленим задачам.

Наукова новизна отриманих результатів полягає у наступному:

- 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;

- 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%;

- 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;

- 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.

Практичне значення одержаних результатів полягає у наступному:

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

- 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, який дозволив щонайменше у 2 рази зменшити тривалості інтервалів часу, коли накопичувач є повністю зарядженим або розрядженим.

- 3) 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 імовірності перезаряду та надмірного розряду накопичувача за умови відсутності BMS-системи на основі теорії мартингалів.

- 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.

5) Використано готові одержані результати у вигляді програмних блоків систем керування перетворювачами локальних систем електроживлення з установками на основі відновлюваних джерел енергії 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». а також при викладанні дисциплін «Теорія інформації», «Пристрої перетворювальної техніки», «Електронні системи керування та регулювання» при підготовці фахівців за спеціальністю 171 «Електроніка» в Національному технічному університеті України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського».

Ступінь обґрунтованості наукових положень, висновків і рекомендацій, сформульованих у дисертації та методи досліджень.

Обґрунтованість та достовірність отриманих результатів підтверджується коректністю основних припущень і положень, покладених в основу наукових досліджень. Всі наукові результати та положення, які містяться в дисертаційній роботі, достатньо науково обґрунтовані, а отримані висновки і наведені рекомендації носять практичний характер та достовірні. Обґрунтованість досліджень, сформульованих у дисертаційній роботі висновків і рекомендацій, обумовлюється обраними методами досліджень: використанням основ теорії ортогональних функцій, ентропійного та фрактального аналізу, теорії мартингалів, теорії імовірностей, комп'ютерним моделюванням запропонованих методів.

Наукові положення, висновки та рекомендації підтверджуються численними публікаціями у фахових виданнях та апробацією їх на наукових конференціях.

Основний зміст дисертації.

У вступі обґрунтовано актуальність теми, сформовано мету і задачі наукового дослідження, показано зв'язок роботи з науковими програмами, темами, викладено наукову новизну і практичне значення результатів досліджень, визначено особистий внесок здобувача, наведено дані про апробацію результатів роботи та публікації.

У першому розділі проаналізовано стан світової відновлювальної енергетики, показано тенденції до зростання її частки в структурі енергопостачання, наведено основні характеристики сонячної та вітрової енергетики.

Описано принципи побудови традиційної енергетичної мережі та сучасних мереж Microgrid. На основі порівняльного аналізу існуючих у Європі систем Microgrid зроблено висновок, що більшість мереж Microgrid є мережами

змінного струму, в усіх системах присутні сонячні батареї та накопичувачі енергії у вигляді акумуляторів. Проведено класифікацію таких систем за рівнем генерації електроенергії, зроблено аналіз режимів роботи локальної система електроживлення малої потужності з врахуванням особливостей підключення та параметрів локальних систем електроживлення.

На основі аналізу методів відбору максимальної енергії у локальних системах електроживлення з установками на основі відновлюваних джерел енергії засобами перетворювальної техніки, показано, що для підвищення ефективності необхідно впроваджувати інтелектуальні механізми керування розподіленими енергетичними ресурсами та їх системну інтеграцію з використанням накопичувачів електричної енергії, що дозволить зменшити частку нерегульованого навантаження в системі. При цьому керування повинно здійснюватись з врахуванням значної розмірності простору даних, різномірності їх потоків, а також – забезпеченням гарантованого електроживлення навантаження протягом наперед визначеного інтервалу часу. Вирішення цієї задачі обумовлює необхідність створення відповідного математичного базису, який включає: 1) застосування аналогу принципу невизначеності Гейзенберга; 2) залучення положень теорії ентропійного та фрактального аналізу; 3) розвиток теорії моментних перетворень та теорії мартингалів, та створення на його основі ефективних алгоритмів і систем керування

На основі проведеного аналізу та обґрунтованої необхідності впровадження інтелектуальних механізмів керування розподіленими енергетичними ресурсами та їх системної інтеграції з використанням перетворювачів та накопичувачів електричної енергії сформульовано основні задачі дисертаційного дослідження.

У **другому розділі** проведено математичне моделювання структури потоку первинної енергії.

Показано, що для ефективного керування локальною системою електроживлення необхідно мати два канали керування: за базовим інтервалом для забезпечення необхідного рівня енергії для заряду накопичувача та за мінімальною тривалістю інтервалу спостереження для забезпечення необхідного рівня максимально можливої енергії, що отримується від відновлюваних джерел.

Показано, що флуктуації електромагнітних процесів у локальній системі електроживлення, які виникають при випадковому характері підключення навантаження або зміні потужності джерела енергії на інтервалі спостереження, відповідають Вінеровському процесу, що робить систему нестійкою. Запропоновано задля забезпечення стійкості мати додатковий запас енергії, величина якої визначається відповідно до закону повторного логарифму.

Показано, що врахування фрактальної природи процесів генерації та споживання енергії дозволяє підвищити точність прогнозування потужності у локальних системах електроживлення. Зокрема, однією з таких інтегральних оцінок потужності сонячного випромінювання на поверхні сонячних батарей є віртуальна щільність хмарного покриву, що розраховується на основі методу зворотного перетворення та перетворення Фур'є. Крім того, параметри потоків

первинної енергії, такі як інтенсивність випромінювання та швидкість вітру, запропоновано визначати опосередковано на основі супровідних даних про температуру повітря, тиск та вологість, за допомогою кореляційного аналізу.

У третьому розділі розглянуто особливості керування перетворювачами на основі розрахунку ентропійної дивергенції. Зокрема показано, що реалізація прогностного керування локальною системою електроживлення з використанням першої вибіркової ентропії, як інтегральної характеристики стану системи, дозволяє оцінювати та порівнювати випадкові процеси генерації, споживання та накопичення енергії, не знаходячи законів їх розподілу. На основі формул теорії моментів побудовано відновлюючий та прогнозуючий поліноми, які дозволяють з похибкою, що не перевищує 23% виконувати прогнозування часового розподілу ентропії Шеннона для потужності споживання. Підвищення точності прогнозування на 11% досягається шляхом врахування фрактальної природи процесу споживання енергії та використання при розрахунках ентропії Реньї дозволило підвищити точність прогнозування на 11%. Для прогнозування потужності на виході сонячних батарей запропоновано новий метод об'єднання найближчих сусідів та кластеризації k-середніх, який дозволяє досягти більшої точності порівняно з класичним методом найближчих сусідів, і в середньому на 25% зменшити похибку прогнозування. Запропоновано спосіб керування зарядно-розрядним пристроєм накопичувача на основі використання функції ентропійної дивергенції, який дозволив на 3% підвищити ефективність використання накопичувача за рахунок зменшення тривалостей інтервалів часу, коли накопичувач повністю заряджений та повністю розряджений.

У четвертому розділі проаналізовано вплив подвійної структури потоків енергії генерації та споживання на розрахунок ентропійної дивергенції. На основі аналізу процесів в накопичувачі оптимізовано його ємність. Обґрунтовано необхідність використання для розрахунку ентропійної дивергенції, замість ентропії Больцмана чи Шеннона, умовної ентропії для поточних розподілів потоків енергії генерації та споживання. Показано, що для забезпечення ефективної роботи накопичувача, в якому ширина зона керованої роботи визначається величиною похибки прогнозування швидкості вітру, необхідно отримувати дані з меншою дискретністю та обирати метод прогнозування швидкості вітру, що забезпечує мінімальну похибку прогнозування. Використано теорію мартингалів для розрахунку імовірностей перезаряду та надмірного розряду накопичувача.

У п'ятому розділі описано запропонований спосіб керування зарядно-розрядним пристроєм накопичувача електроенергії у локальній системі електроживлення. Для реалізації вказаних особливостей керування розроблено програмне забезпечення, що дозволяє реалізовувати прогностне керування локальною системою електроживлення на основі розрахунку ентропійної дивергенції. Проведено комп'ютерне дослідження електромагнітних процесів у локальній системі електроживлення з сонячною батареєю в якості установки на основі відновлюваного джерела енергії та накопичувачем за допомогою

програмного пакету Matlab R2023a Simulink, яке підтвердило правочинність використання запропонованих математичних моделей.

У шостому розділі розглянуто особливості керування процесами генерації, накопичення та споживання енергії у локальних системах електроживлення. На основі аналогу принципу невизначеності Гейзенберга та принципу синергетичного розвитку та когнітивності керування обґрунтовано необхідність створення нового найвищого рівня ієрархії керування, який реалізує принцип преемптивного керування, що реалізує випереджувачим чином усунення загрози руйнування системи і локалізацію технічних об'єктів, що породжують загрозу. Показано, що інтеграція в контекст інформації, що надходить від різнотипних відновлюваних джерел енергії, накопичувачів та споживачів, дозволяє отримати модель поточного стану реальної локальної системи електроживлення, на підставі якої системою керування може бути згенеровано необхідне керуюче рішення для перетворювачів параметрів електричної енергії з множини можливих рішень.

У висновку сформульовані основні результати дослідження, які дозволили оцінити вклад автора дисертаційної роботи в подальший розвиток теорії керування напівпровідниковими перетворювачами, заснованих на аналогові принципу невизначеності Гейзенберга, ентропійному аналізі потоків енергії генерації та споживання з врахуванням їх подвійної структури та фрактальної природи, для вирішення проблеми підвищення ефективності використання енергії у локальних системах електроживлення з установками на основі відновлюваних джерел енергії.

Основні результати роботи й загальні висновки.

У роботі вирішена актуальна науково-прикладна проблема підвищення ефективності використання енергії у локальних системах електроживлення з установками на основі 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.

1. Обґрунтовано необхідність створення математичних основ ефективного керування перетворювачами у локальних системах електроживлення з врахуванням подвійної структури потоків енергії. Проведений аналіз довів, що перспективним напрямком дослідження є розвиток теорії ентропійного аналізу із залученням положень теорії фрактального аналізу, моментних перетворень та теорії мартингалів.

2. На основі врахування аналогу принципу невизначеності Гейзенберга для ефективного керування локальною системою електроживлення реалізовано інтервальне керування перетворювачами: на базовому інтервалі для забезпечення необхідного рівня енергії для заряду накопичувача та на інтервалі спостереження для забезпечення необхідного рівня максимально можливої енергії, що отримується від установок на основі відновлюваних джерел.

3. Доведено, що при випадковому характері підключення навантаження або зміни потужності джерела енергії на інтервалі спостереження флуктуації електромагнітних процесів у локальній системі електроживлення відповідають Вінеровському процесу, що переводить систему до режиму нестійкої роботи.

4. Застосування теорії моментів для побудови відновлюючого та прогнозуючого поліному дозволяє з похибкою, що не перевищує 23% виконувати прогнозування часового розподілу ентропії Шеннона для потужності споживання. Підвищення точності прогнозування на 11% досягається шляхом врахування фрактальної природи процесу споживання енергії та використання при розрахунках ентропії Реньї.

5. Запропонований метод об'єднання найближчих сусідів та кластеризації k-середніх дозволяє досягти більшої точності прогнозування потужності генерації сонячних батарей порівняно з класичним методом найближчих сусідів, і зменшити середню абсолютну похибку у відсотках до 4%.

6. Розроблений метод керування функцією зарядного струму накопичувачем у локальній системі електроживлення на основі розрахунку ентропійної дивергенції потоку енергії на його виході дає змогу на 3% підвищити ефективність його використання за рахунок зменшення тривалостей інтервалів часу, коли накопичувач повністю заряджений та повністю розряджений.

7. Врахування стохастичного характеру потоків енергії генерації та споживання, а також їх статистичну залежність призводить до необхідності розрахунку ентропії Реньї, умовної ентропії поточних розподілів потоків енергії генерації та споживання та ентропії перезаряду та надмірного розряду накопичувача.

8. Застосування теорії мартингалів дає змогу оцінити кількість енергії, яка може виявитись надмірною при заряді накопичувача та кількість енергії, яка може виявитись недостатньою при його розряді накопичувача, та визначити імовірності його перезаряду та надмірного розряду за умови відсутності BMS-системи.

9. Комп'ютерне дослідження електромагнітних процесів у локальній системі електроживлення з сонячною батареєю як установки на основі відновлюваного джерела енергії та накопичувачем за програмного пакету Matlab R2023a Simulink підтвердило правочинність використання запропонованих математичних моделей.

10. Розроблене програмне забезпечення дає змогу виконувати прогнозне керування зарядно-розрядним пристроєм накопичувача у локальній системі електроживлення з установками на основі відновлюваних джерел енергії на основі розрахунку різниці ентропійних дивергенцій зі сторони джерела та навантаження та формувати сигнал керування комутатором зарядно-розрядного пристрою в залежності від знаку алгебраїчної різниці.

Оцінка змісту на оформлення дисертації.

За змістом та оформленням дисертаційна робота й автореферат відповідають встановленим вимогам з атестації кадрів щодо обсягу і структури.

Структура та обсяг дисертації. Дисертаційна робота складається із змісту, вступу, 6 розділів, висновків, списку використаної літератури із 235 найменувань та 5 додатків. Загальний обсяг роботи становить 395 сторінок, у тому числі 244 сторінки основного тексту, 129 рисунків та 43 таблиці

Зміст автореферату відображає основні положення дисертації. Автореферат дисертації в необхідній мірі розкриває мету, завдання та отримані в роботі результати, викладений якісною технічною мовою, досить повно і точно відображає основний зміст дисертації і свідчить про достатню професійну підготовку здобувача.

Апробація результатів дисертації.

Основні наукові теоретичні та практичні результати дисертаційних досліджень доповідалися і обговорювалися на міжнародних науково-технічних конференціях: «Проблеми сучасної електротехніки (м. Київ, 2018, 2020 pp.), «Smart-технології в енергетиці та електроніці» (м. Лазурне, 2017 – 2021 pp.), «IEEE International Conference on Electronics and Nanotechnology», ELNANO (м. Київ, 2022 p.), «IEEE International Conference on Information and Telecommunication Technologies and Radio Electronics», UkrMiCo (м. Київ, 2023 p.), International conference Generacja-Przesył- Wykorzystanie GPW (м. Вроцлав, 2017 – 2023 pp.), а також на наукових семінарах «Напівпровідникові перетворювачі в пристроях промислової електроніки» секції «Перетворення параметрів електричної енергії» НАН України (м. Київ, 2020 – 2022 pp.).

Повнота викладення основних положень дисертації в наукових працях.

Основні положення та результати дисертації 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 без співавторів), 3 тезах доповідей в збірниках матеріалів конференцій.

Опубліковані роботи у повній мірі висвітлюють основний зміст, результати, висновки і рекомендації дисертації.

Особистий внесок здобувача.

Всі основні результати дисертації, що виносяться на захист, отримані здобувачем самостійно. В роботі викладено авторській підхід до підвищення ефективності використання енергії у локальних системах електроживлення з установками на основі відновлюваних джерел енергії за рахунок запропонованих методів інтервального керування перетворювачами локальної системи електроживлення на основі врахування аналогу принципу невизначеності Гейзенберга; прогнозування потужності генерації сонячних батарей на основі об'єднання методів найближчих сусідів та кластеризації k-середніх; керування перетворювачами для розподілу енергії між накопичувачами та навантаженням в таких системах на основі розрахунку ентропійної дивергенції; підвищення точності прогнозування потужності споживання з врахуванням фрактальної природи процесів генерації та споживання енергії.

Внесок автора в роботи, що були опубліковані у співавторстві, конкретизовано у списку публікацій.

У дисертації не використовувались матеріали кандидатської дисертації.

Враховуючи вищенаведене, слід вважати ступінь обґрунтованості наукових положень, висновків та рекомендацій такою, що відповідає вимогам щодо дисертаційних робіт, представленим на отримання наукового ступеня доктора технічних наук.

Зауваження до змісту дисертації та автореферату дисертації.

1. В роботі 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. Однак назва «метод інтервального керування» зразу нашоує на думку про використання підходів інтервального аналізу, що базуються на представленні фізичних величин не точками, а заданими інтервалами, і методів мінімізації похибки при математичному моделюванні різного роду процесів з використанням цих підходів. Можливо доцільно в назві розробленого методу підкреслити, що це часові інтервали, і мова йде про встановлення мінімальної кількості інтервалів спостереження задля обчислення максимальної відібраної енергії від установок на основі відновлюваних джерел.

2. На рис. 2.5 наведено часові діаграми зміни напруги на навантаженні, а також сигналів керування ШІП сонячної батареї та зарядно-розрядного пристрою накопичувача. Однак, по часовій осі одиниці вимірювання проставлено як «сек», що не відповідає прийнятим скороченням в Міжнародній системі одиниць.

3. Зустрічаються поодинокі граматичні помилки.

4. Є деякі незначні невідповідності в авторефераті.

Висновок.

Представлена дисертація Клен Катерини Сергіївни «Теоретичні засади побудови систем керування перетворювачами на базі ентропійної дивергенції» за рівнем отриманих наукових результатів, змістом та обсягом є закінченою науковою працею, в якій отримані нові вагомі науково обґрунтовані теоретичні, експериментальні та практичні результати, що в сукупності вирішують актуальну науково-прикладну проблему підвищення ефективності використання енергії у локальних системах електроживлення з установками на основі 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.

Робота актуальна, має наукову новизну, нові наукові результати і практичне значення. Результати роботи достовірні.

Висловлені зауваження не впливають на загальну позитивну оцінку виконаної дисертаційної роботи, а лише підкреслюють її багатогранність, складність, узагальнення результатів виконаних досліджень і не знижують загальної оцінки роботи. Дисертаційна робота Клен К. С. за змістом, одержаними науковими результатами та їх практичним впровадженням відповідає вимогам пп. 6, 7, 8, 9 «Порядку присудження та позбавлення наукового ступеня доктора наук», який затверджено Постановою Кабінету Міністрів України від 17 листопада 2021 р. №1197, а її автор Клен Катерина Сергіївна заслуговує присудження наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.09.12 – «Напівпровідникові перетворювачі електроенергії».

Офіційний опонент:

доктор технічних наук, професор,
професор кафедри радіотехнічних систем
Тернопільського національного технічного
університету імені Івана Пулюя



Володимир ЯСЬКІВ

Підпис Володимира ЯСЬКІВА засвідчую.
Вчений секретар Вченої ради Тернопільського
національного технічного університету
імені Івана Пулюя, к.т.н., доц.




Галина КРАМАР