

ВІДГУК

офіційного опонента на дисертаційну роботу

КЛЕН КАТЕРИНИ СЕРГІЇВНИ

на тему «**Теоретичні засади побудови систем керування**

перетворювачами на базі ентропійної дивергенції»,

подану на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук

за спеціальністю 05.09.12 «Напівпровідникові перетворювачі електроенергії»

Актуальність теми виконаних досліджень, її зв'язок з державними науковими програмами.

Побудова систем енергоживлення на основі відновлювальних джерел електроенергії (ВДЕ) сприяє збереженню корисних копалин (вугілля, нафта, газ) та дозволяє позбавитися негативного впливу на навколишнє середовище наслідків їх використання для виробництва електроенергії. Підвищення конкурентоздатності «чистих» з точки зору вимог екології джерел енергії на основі використання енергії повітря та сонця, порівняно з традиційними джерелами енергії пов'язане з вирішенням низки принципових проблем.

В першу чергу – це актуальна проблема відбору максимальної потужності від джерел живлення та реалізація режиму оптимального використання енергії накопичувача. Вирішення цієї проблеми призводить до мінімізації розбіжностей між потоками енергії, що генеруються та споживаються. Практична реалізація цієї проблеми попередньо висуває актуальну необхідність створення теоретичних основ її рішення, що є основною метою дисертаційної роботи. 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:

1) 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 вентильно-індукторних двигунів дрона з багатокомірковими перетворювачами і просторово-часовою модуляцією» (№ ДР 0120U102131, 2020 – 2021 рр.);

2) 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.).

У зазначених науково-дослідних роботах автором зроблено обґрунтування задач дослідження та розроблено теоретичні основи енергоефективного керування перетворювачами у системах електроживлення.

Оцінка змісту дисертації.

Повний обсяг дисертації становить 395 сторінок друкованого тексту, містить анотацію (українською та англійською мовами), зміст, перелік умовних скорочень. Основна частина викладена на 244 сторінках. Список використаних джерел складається з 235 найменувань на 25 сторінках. Дисертація містить 129 рисунків, 43 таблиці та 5 додатків.

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

У першому розділі розглянуто структуру та класифікацію систем, що побудовано на основі ВДЕ, показана динаміка зростання застосування відновлювальних джерел енергії у світі, наведено основні характеристики

сонячної та вітрової енергетики. Розглянуто особливості побудови мереж на основі ВДЕ в країнах Європи. Це схема мережі Microgrid, яка в порівнянні з повністю автоматичними традиційними системами електроживлення передбачає втручання в процес роботи електротехнічного обладнання людського фактору, що збільшує кількість можливих сценаріїв, які підлягають обробці для подальшого використання отриманих результатів при побудові алгоритму керування Microgrid.

Наведені структурна схема локальної системи електроживлення та схеми перетворювачів, що є її складовими частинами, сформульовано вимоги до теорії керування перетворювачами на основі ентропійного аналізу. Поставлена задача створення алгоритму та системи керування накопичувачем з врахуванням подвійної структури потоку даних у системі електроживлення. Розглянуто методи підвищення ефективності використання електроенергії засобами перетворювальної техніки з врахуванням особливості структурних схем підключення станцій на основі ВДЕ до систем електроживлення. Розглянуто умови відбору максимальної енергії від сонячних батарей та вітроенергетичних установок та умови ефективного використання енергії накопичувача. Зроблено висновок про те, що ефективне використання електроенергії у локальних системах електроживлення досягається за допомогою пристроїв перетворювальної техніки. Для цього необхідно сформулювати керуючі впливи на основі аналізу характеристик генерації та споживання окремих пристроїв та всієї локальної системи електроживлення. Розглянуто схему формування простору різномірних даних у локальних системах електроживлення з ВДЕ. Показано, що зі збільшенням кількості джерел навантаження та параметрів, що визначають потужність на їх виході, число сполучень параметрів зростає, що призводить до необхідності роботи з простором даних великої розмірності. Це породжує необхідність зменшення розмірності простору даних зі збереженням корисної інформації за рахунок застосування інтегральних оцінок зміни параметрів системи. Для зменшення обсягу обчислень запропоновано при формуванні алгоритмів керування

розділити їх на трендостійкі процеси з керуванням на базовому інтервалі за середнім значенням енергії на ньому та на флуктуації, що відповідають Вінеровському процесу. Показано, що в процесі аналізу умов генерації споживання та накопичення енергії необхідно виконати низку вимог з врахуванням стохастичного характеру потоку первинної енергії флуктуації та інших особливостей систем живлення з ВДЕ. На основі аналізу особливості задачі керування створені підзадачі керування та рекомендовано математичний апарат для їх рішення. З врахуванням аналогу принципу невизначеності Гейзенберга показано, що для ефективного керування системою електроживлення необхідно мати два канали управління за максимальною тривалістю базового інтервалу та за мінімальною тривалістю інтервалу спостереження.

Показано, що окрім виконання умов балансу енергії у локальних системах електроживлення треба виконувати умови балансу статистичних моментів; запропоновано застосування ентропії як міри неповноти інформації локальної системи електроживлення, що дозволяє детально оцінити специфіку характеристики конкретної системи і оцінити адекватність інструментарію, що використано при прогнозному моделюванні. Показано роль фрактального аналізу для підвищення точності прогнозування потужності генерації та споживання. Запропоновано методи апроксимації та відновлення даних потужності генерації та споживання з використанням ортогональних функцій Уолша та Франкліна.

Результати, що наведено в першому розділі покладені в основу при формуванні змісту задач для подальшого теоретичного дослідження.

У другому розділі вирішувалися питання математичного моделювання структури потоків первинної енергії, розглянуто особливості інтервального керування в процесі відбору максимальної енергії в конкретний час та визначення її середнього значення. Для апроксимації функцій зміни потоків енергії, запропоновано використання ортогональних функцій Франкліна, Уолша, Хаара.

Показано, що коли функція зміни потоку первинної енергії є періодичною, для кусково-лінійної апроксимації доцільно використовувати функції Уолша, а в інших випадках – функції Франкліна. Специфіка локальних систем електроживлення полягає в тому, що процес зміни енергії в цих системах має подвійну структуру і складається з основного тренду та флуктуацій з відповідними показниками математичного сподівання та дисперсії. Наведені графіки зміни потужності на виході сонячних батарей в відповідний час, з яких зроблено висновок про необхідність врахування впливу флуктуацій з точки зору економічної доцільності. Показано, що для зменшення впливу флуктуацій процесу зміни енергії, що пов'язано зі зміною навантаження, або зміною рівня енергії, яку генерують установки на основі ВДЕ, необхідно у локальних системах встановити накопичувачі енергії для компенсації зміни енергії у відповідному діапазоні. Відмічено, що при збільшенні у системі кількості джерел, навантажень та параметрів, що визначають показники потужності на їх виході, значно зростає число сполучень параметрів, що обумовлює зростання розмірності простору даних, що призводить до збільшення обчислених потужностей та алгоритмів обробки даних. Виникає необхідність зменшення розмірності простору даних зі збереженням корисної інформації за рахунок застосування інтегральних оцінок зміни параметрів системи. Відмічено, що на поверхні сонячних батарей є віртуальна щільність хмарного покриву, яку запропоновано розраховувати на основі методу зворотного перетворення та перетворення Фур'є. Це дає можливість врахувати особливості географії місцевості та умови, в яких працює сонячна батарея. Запропоновано застосовування кореляційного аналізу для оцінки параметрів потоків первинної енергії на основі аналізу погодних умов. Показано, що точність прогнозування потужності генерації та споживання можна підвищити за рахунок врахування фрактальної природи означених процесів. Розрахунок фрактальної розмірності процесів в системі з ВДЕ дає можливість аналізувати стабільність та стійкість локальної системи електроживлення. Науковий результат та рекомендації, що стосуються

побудови систем електроживлення з ВДЕ є представлено відповідними висновками.

У третьому розділі досліджено керування перетворювачами на основі ентропійної дивергенції з врахуванням того фактору, що імовірності часового розподілу потоків первинної енергії на вході системи повинні дорівнювати їх значенню на виході системи.

Для аналізу статистичної взаємодії елементів таких систем виконано розрахунок ентропійної дивергенції, що враховує довільний розподіл імовірності. Для оцінки відхилення даних розподілів амплітуд потужності на виході сонячної батареї та параметрів навколишнього середовища від ідеальних, використано першу вибірку ентропію як різновид ентропії Шеннона.

Спрогнозовано значення першої вибіркової ентропії на відповідні дні спостереження, що реалізовано для оцінки та порівняння випадкових процесів генерації, споживання та накопичення енергії.

Проведено розрахунки часових значень ентропії Шеннона для потужності споживання на протязі відповідного часу. Для покращення точності прогнозуванні потужності споживання враховано фрактальну природу процесу споживання енергії. Для підвищення точності прогнозування потужності на виході сонячної батареї рекомендовано об'єднувати метод найближчих сусідів та попередню кластеризацію. Кластер обирають за коефіцієнтом силуету для визначення якості проведеної кластеризації. Локальна система електроживлення розглянута з врахуванням її двох складових: підсистеми генерації з відповідною кількістю генераторів та підсистеми споживання з певною кількістю споживачів. Для таких систем складені рівняння балансів «носіїв» та «ресурсів» окремих підсистем, що є її складовими. Їх ефективну роботу забезпечено виконанням балансів «носіїв», «ресурсів» та енергії у кожний конкретний момент часу.

Розраховані імовірності мікро- та макростанів підсистем генерації та споживання локальних систем електроживлення дозволяють знайти ступінь варіабельності процесів генерації, споживання та накопичення енергії.

Вирази, що отримано для розрахунку ентропійних дивергенцій, співпадають з виразами для розрахунку дивергенції Кульбака-Лейблера. Максимум ентропії генерації та споживання відповідає мінімуму ентропійної дивергенції. Виконання балансу «носіїв» та «ресурсів» забезпечує накопичувач електроенергії. Функцію керування зарядним струмом, яку визначено як різницю ентропійних дивергенцій за Деласом зі сторони генераторів та споживачів для різних імовірностей. Показано, що момент часу, коли рівень енергії, що генерує установка, менша, ніж рівень енергії ідеального випадку (крива), накопичувач розряджається і виступає додатковим генератором; коли рівень енергії, що генерує система на основі ВДЕ більший за рівень енергії ідеальної кривої, накопичувач заряджається і виступає споживачем.

Теоретичні викладки, що отримано, підтверджені результатами математичного моделювання роботи локальної системи електроживлення у програмному пакеті MatLab. За результатами моделювання отримано часову залежність зміни станів заряду накопичувача. Для наближення режиму роботи накопичувача до гранично допустимого рекомендовано у відповідності до ентропійної дивергенції потоку сонячного випромінювання, взятої з протилежним знаком, змінювати функцію зарядного струму накопичувача, не збільшуючи при цьому величину абсолютної ємності. За результатами досліджень, що проведено у третьому розділі, запропоновано спосіб керування функцією зарядного струму накопичувача у локальних системах електроживлення, який дозволяє на 3% підвищити ефективність використання енергії первинного потоку в системі внаслідок зменшення на 50% тривалості інтервалу часу, коли накопичувач є повністю зарядженим та на 20% тривалості інтервалу часу, коли накопичувач є повністю розрядженим.

У четвертому розділі досліджено вплив структури потоків енергії на розрахунок ентропійної дивергенції.

Враховано, що накопичувачі в системах з ВДЕ повинні відповідати режиму роботи системи щодо обсягу та часу накопичення енергії; необхідно проводити дослідження динаміки стохастичних процесів зміни потоків первинної енергії та енергії, що споживається на інтервалах спостереження.

Оскільки потужність на виході установки на основі ВДЕ залежить від швидкості вітрового потоку та інтенсивності сонячного випромінювання, що є випадковими факторами, які залежать від часу, то побудовано графіки функцій математичного сподівання генерації та споживання, з яких знайдено інтервали стаціонарності функцій потужності на виході системи. Запропонована методика розрахунку простору потужності та напруги на виході системи з ВДЕ для наявності вітрогенератора та сонячної батареї в якості джерела живлення з врахуванням того, що відхилення потужності від середнього значення є Вінеровським процесом. Для випадку, коли потужність навантаження є випадковою функцією, враховано сумісний вплив двох випадкових функцій та визначено їх статистичні характеристики. Математичне сподівання суми двох випадкових функцій потужності на виході ВДЕ та навантаженні з відповідними випадковими реалізаціями визначено сумою математичних сподівань кожної функції. Показано, що для реалізації ефективного прогнозу керування системою з ВДЕ необхідно за прогнозованими значеннями потужності на виході системи визначити рівень надлишкової енергії для заряду-розряду накопичувача. Для забезпечення мінімальної похибки прогнозування швидкості вітру проведено порівняння існуючих методів прогнозування та оцінено вплив дискретності даних на похибку прогнозування. Показано, що точність прогнозування для даних отриманих з дискретності 5 хвилин в півтора-два рази більше ніж для даних отриманих з дискретністю одна година. Зменшення ширини зони керованої роботи накопичувача до 68% призводить до збільшення тривалості часу, коли накопичувач є некерованим. Це вимагає застосування додаткових методів для

підвищення точності прогнозування параметрів потоків первинної енергії. Збільшення тривалості інтервалів часу, коли накопичувач є некерованим, призводить до зменшення зони розрахунку ентропійної дивергенції. Досліджено процес коливання рівня енергії на виході системи з ВДЕ відносно її середнього значення та послідовність відхилення кількості енергії, що потрапляє на заряд або розряд накопичувача. Отримано формули для розрахунку ймовірностей надмірного розряду, або перезаряду накопичувача в відповідний момент часу у симетричному та несиметричному випадках. Отримано графіки залежності ймовірностей надмірного розряду та перезаряду накопичувача від величин достатнього рівня енергії розряду та надмірного рівня енергії заряду. З ростом значення надмірного рівня енергії заряду і недостатнього рівня енергії розряду, ймовірність надмірного розряду та заряду накопичувача збільшується. Рекомендовано при розрахунку ентропійної дивергенції для формування сигналів керування накопичувачем у системи електроживлення з ВДЕ враховувати не лише ентропії поточного та заданого розподілів потоків енергії генерації та споживання, але й ентропії перезаряду та надмірного розряду накопичувача. Їх врахування зменшує значення ентропійної дивергенції у системах.

У п'ятому розділі розглянуто питання керування зарядно-розрядним пристроєм накопичувача шляхом визначення різниці ентропійних дивергенцій. Специфіка керування пов'язана зі змінами та ймовірнісним характером потужності на його виході. Відмічено, що в існуючих системах керування накопичувачем здійснюється без врахування ймовірностей характеристик потоків первинної енергії та навантаження. Для врахування ймовірних характеристик потоків первинної енергії та навантаження та підвищення ефективності роботи накопичувача запропоновано сигнал керування ключем накопичувача формувати відповідно до алгебраїчної різниці між значенням ентропій дивергенції потоку енергії на виході установки та значенням ентропійної дивергенції потоку енергії, що споживає навантажувач. Запропоновано функціональну схему системи керування

накопичувачем. Ентропійну дивергенцію зі сторін навантаження та джерела розраховано як статистичну відстань між заданим та поточним розподілами потоків генерації та споживання. Задаючий розділ генерації системи сонячною батареєю виражають добовою ідеальною кривою сонячного випромінювання. Заданий розподіл споживання обрано таким, що відповідає місцевості де встановлена система. Часові залежності ентропійної дивергенції зі сторін джерела та навантаження представлені відповідними закономірностями, які мають нерівномірний характер. Ця особливість використовується для формування сигналу управління (меандра) ключем. Коли ентропійна дивергенція джерела вище ентропійної дивергенції навантаження, накопичувач заряджається. В протилежному випадку накопичувач розряджається. Для зменшення часових інтервалів, коли накопичувач повністю заряджений, або розряджений, запропоновано формувати сигнал управління релейним елементом з врахуванням різниці між ентропійними дивергенціями джерела та навантаження. Для підтвердження теоретичних результатів проведено моделювання системи електроживлення на основі сонячної батареї. Розроблена схема моделі локальної системи електроживлення, описання роботи якої наведено в даному розділі. За результатами моделювання отримано часові залежності зміни стану струму розряду, напруги накопичувача, сигналу комутації при використанні балансування потужності, а також часові залежності зміни стану заряду, струму розряду, напруги накопичувача, сигналу комутації при використанні різниці ентропійних дивергенцій. Врахування фрактальних розмірностей графіків генерації та споживання енергії дало можливість отримати часові залежності, зміни стану заряду, розряду напруги накопичувача, сигналу комутації. Для реалізації розробленого способу керування зарядно-розрядним пристроєм накопичувача було розроблено необхідне програмне забезпечення мовою програмування MatLab та Python. Наведено блок-схему алгоритму керування комутатором зарядно-розрядного пристрою накопичувача.

У шостому розділі досліджено перспективи керування процесами генерації накопичення та споживання енергії. Визначено доцільність використання перспективних методів керування процесами генерації, накопичення та споживання енергії у локальних системах електроживлення з ВДЕ.

У локальних системах електроживлення логіка побудови і робота систем керування базується на аналогові принципу невизначеності Гейзенберга. В роботі визначено п'ять рівнів ієрархії керування. Перший рівень передбачає керування станом окремих пристроїв генерації, розподілення, перетворення і накопичення електроенергії. Системи керування цього рівня задають алгоритми роботи силового обладнання. Другий рівень передбачає керувану групою спільно працюючих силових пристроїв в системах з багатоконтурними зворотними зв'язками. Третій рівень відповідає реалізації контекстно-залежного керування на основі застосування мікропроцесорних систем, методів обробки поточкових даних, операційних додатків, інтелектуальних датчиків. Розглянуто фактори, які впливають на прийняття рішення по керуванню. Системи четвертого рівня запропоновано будувати на спільному застосуванні теорії великих даних, контекстно-залежного керування і встановлених операційних додатків, спрямованих на ефективне використання енергії та сталої роботи системи в цілому. Системи керування п'ятого рівня забезпечують протидію негативним явищам. Вони реалізують принципи преемптивного керування соціально-технічною системою. Реалізація такого керування дає змогу вносити глобальні зміни у структуру зв'язків та відносин у локальних системах електроживлення.

Показано, що практичне використання установок на основі ВДЕ вимагає модернізацію інфраструктури існуючих систем електроживлення.

Процес керування в них забезпечується постійною циркуляцією інформації, що з одного боку є контекстними даними, а з іншого боку задаючими сигналами, які є часовими рядами миттєвих значень потужності регулювання джерел енергії і окремих перетворювачів.

Показано, що вирішення задачі сумісних взаємодії пристроїв перетворюваної техніки, підключених до накопичувачів з різними режимами роботи, можливо на основі застосування теорії ігор.

Ефективне керування накопичувачем енергії дозволить зменшити кількість енергії, що протікає через нього при подвійному перетворенні на заряд та розряд, що призведе до зменшення втрат енергії.

У додатках наведено список публікацій за темою дисертацій та відомості про апробацію роботи; аналітичні вирази та графіки апроксимуючих ортогональних функцій; матриці та графіки коефіцієнтів кореляції значення ймовірностей та ентропії; код програмного забезпечення; документ, що підтверджує впровадження результатів дисертаційної роботи.

Наукова новизна роботи.

1. Запропонований метод інтервального керування перетворювачами на основі врахування аналогу принципу невизначеності Гейзенберга дозволив в 2 рази зменшити кількість інтервалів спостереження.

2. Розроблений метод прогнозування потужності генерації сонячних батарей на основі об'єднання методів найближчих сусідів та кластеризації середніх дозволив зменшити середню абсолютну похибку прогнозування до 4%.

3. Розроблений метод керування перетворювачами у локальних системах електроживлення з установками на основі відновлюваних джерел енергії на основі розрахунку ентропійної дивергенції дозволив на 3% підвищити ефективність використання енергії первинного потоку в системі.

4. Врахування фрактальної природи процесів генерації та споживання енергії при розрахунку імовірнісних моментів при прогнозуванні часового розподілу ентропії Шеннона та Ренї дозволяє на 11% підвищити точність прогнозування потужності споживання.

Практичне значення отриманих результатів.

1. Розроблений алгоритм прогнозування та відновлення часового розподілу потужності споживання на основі теорії моментів дозволяє підвищити точність прогнозування.

2. Створений спосіб керування зарядно-розрядним пристроєм накопичувача на основі визначення різниці ентропійних дивергенцій зі сторони джерела та навантаження дозволив щонайменше у 2 рази зменшити тривалості інтервалів часу, коли накопичувач є повністю зарядженим або розрядженим.

3. Розроблений алгоритм оцінювання кількості енергії, яка може виявитись надмірною при заряді накопичувача та кількості енергії, що може виявитись недостатньою при його розряді, на основі теорії мартингалів дозволив визначити імовірності перезаряду та надмірного розряду накопичувача.

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.

Одержані результати є готовими для використання у вигляді програмних блоків систем керування перетворювачами локальних систем електроживлення з установками на основі відновлюваних джерел енергії.

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». Також результати досліджень застосовано у дисциплінах «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».

Обґрунтованість та достовірність наукових положень, висновків та рекомендацій.

Обґрунтованість та достовірність результатів підтверджується коректністю основних припущень і положень, покладених в основу наукових досліджень. Це стосується коректності методів дослідження, що складаються з теоретичною складовою та комп'ютерного моделювання, збігом отриманих теоретичних результатів з результати математичного моделювання.

Повнота викладу результатів в опублікованих працях.

За темою дисертації здобувачкою опубліковано у 36 наукових праць, у тому числі: 1 монографія, 32 статті 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 тези доповідей в збірниках матеріалів конференцій. В опублікованих працях викладено в повному обсязі основні положення дисертаційної роботи, яка винесена на захист. Особистий внесок здобувачки сумісних роботах є підтвердженим. Рівень та кількість публікацій і рівень апробації відповідає вимогам, що ставляться до докторських дисертацій в Україні.

Відповідність змісту реферату основним положенням дисертації.

Реферат в повній мірі відображає зміст та положення дисертації.

Використання в докторській дисертації результатів наукових досліджень захищеної кандидатської дисертації.

В роботі не використовувались результати досліджень, які представлено в кандидатській дисертації.

Оформлення дисертації.

Оформлення відповідає «Порядку присудження та позбавлення наукового ступеня доктора наук» затвердженого постановою Кабінету Міністрів України від 17 листопада 2021 р. №1197 та ДСТУ 3008-95

«Документація. Звіти у сфері науки і техніки. Структура і правила оформлення». Стиль викладення відповідає загальноприйнятому і має достатній науковий рівень.

Зауваження по дисертаційній роботі.

1. На схемі, рис 1.13 а, функція блоку СК пов'язана з забезпеченням «ефективності роботи». Про це йдеться і на сторінці 48, де сказано «про ефективне використання» електроенергії засобами перетворювальної техніки. Ефективність роботи класичних систем управління та регулювання характеризує низка показників: запас стійкості, перерегулювання, ступінь коливальності процесу, час перехідного процесу, статична помилка та інше. Треба пояснити, чим характеризуються показники ефективності використання електроенергії системи електроживлення з ВДЕ, в якій відсутні еталонні значення параметрів, що регулюються.

2. Для обробки даних стосовно потужності генерації та споживання використовується перетворення Фур'є на основі базисних ортогональних функцій Уолша, Хаара, які не неперервні (1.10). Вони дискретні тому, що на одиночному інтервалі змінюють свій знак. Їх можна представити у вигляді решіткових функцій (1.11).

3. Мета дисертації спрямована на розробку теорії управління перетворювачами в системі електроживлення з ВДЕ на основі принципу невизначеності Гейзенберга. Чи розглядався варіант побудови такої системи як система слідування зі спостерігачем (штучний інтелект), який слідує за балансом потоків вхідної та вихідної енергії системи електроживлення з ВДЕ?

4. У висновках по першому розділу не представлена критична оцінка відомих підходів до вирішення проблеми, яка досліджувалась в дисертації. В окремих розділах висновки за результатами досліджень мають великі обсяги та перевантажені термінологією, що характеризує показники імовірнісних процесів. Це створює певні незручності при оцінці отриманих наукових результатів.

5. На рис 2.1 представлені результати апроксимації функцій зміни

швидкості вітру функціями Франкліна та Уолша, які показують, «..що на кінцях інтервалу відхиленнях апроксимуючих значень (може апроксимованих?) є найбільшим, що подібно явищу Гіббса..». Про які значення йдеться мова і чому їх відкидання зменшує похибку апроксимації? Ряд Фур'є за функціями Уолша є істотним для апроксимації дискретних процесів; похибка апроксимації існує тоді, коли кількість членів, що залишається за результатами розкладання, менше, ніж кількість врахованих дискретних значень функції, яка розкладається. При наявності синхронізму між розривами функції, що апроксимується та функціями Уолша, сума їх кінцевого числа апроксимує цю функцію з нульовою похибкою. Ефект Гіббса відсутній.

6. В четвертому розділі на основі розрахунків показано, що для прогнозування краще використовувати дані, які отримані з меншим інтервалом дискретності. Це забезпечує підвищення точності прогнозування. Такий висновок є очевидним згідно відомої теореми про апроксимацію неперервних функцій дискретними вибірками.

7. У шостому розділі, стор. 289, сказано, що «..контекстно-залежне керування доцільно використовувати у локальних системах електроживлення з великою структурною складністю..». Однак варто відмітити, що за останні роки ціна на фотоелектричні панелі у США знизилася на 70% в зв'язку з появою їх нового покоління; тому перевага зараз віддається інвестиціям у сонячну енергетику для домашнього господарювання. Це прості та швидкі в розгортанні фотоелектричні системи, які не вимагають складної інфраструктури.

Висновок.

Дисертація Клен К.С. «Теоретичні засади побудови систем керування перетворювачами на базі ентропійної дивергенції» є завершеною та самостійною науково-дослідною роботою, в якій вирішується важлива наукова проблема побудова систем енергоживлення на основі ВДЕ

(відновлювальних джерел електроенергії).

Дисертаційна робота здобувача за своїм рівнем, обсягом і якістю досліджень відповідає вимогам пунктів п.7 та 9 «Порядку присудження та позбавлення наукового ступеня доктора наук» затвердженого постановою Кабінету Міністрів України від 17 листопада 2021 р. №1197, а її авторка Клен Катерина Сергіївна, заслуговує присудження наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.09.12 «Напівпровідникові перетворювачі електроенергії».

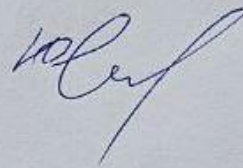
Офіційний опонент:

завідувач кафедри електроніки,

автоматики, робототехніки та мехатроніки

Національного університету «Чернігівська політехніка»,

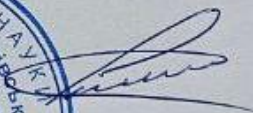
д. т. н., проф.



Юрій ДЕНИСОВ

22.04.2025

Підпис Денисова Ю.О., засвідчую
Вчений секретар Національного університету
«Чернігівська політехніка» Клен Ігор



О.О. Сидоренко