

РЕЦЕНЗІЯ

кандидата технічних наук, доцента, доцента кафедри комп'ютерної інженерії та електромеханіки

Київського національного університету технологій та дизайну

Світлани Анатоліївни ДЕМІШОНКОВОЇ

на дисертаційну роботу Кругляка Геннадія Віталійовича на тему:

«Підвищення рівня споживання фотоелектричної енергії в системі електроживлення локального об'єкту»,

подану на здобуття ступеня доктора філософії

за спеціальністю 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»

Актуальність теми дисертації.

Широкі використання фотоелектричних систем є загальносвітовим трендом розвитку енергетики. Але при цьому виникає ціла низка проблем, пов'язаних із нерівномірністю надходження енергії та забезпеченням її використання. Тому сучасною тенденцією є споживання енергії на місці генерації за мінімального експорту енергії. Це стосується і локальних об'єктів приватного сектору де розповсюджено гібридні фотоелектричні системи з накопичувачами електроенергії та підключенням до розподільчої мережі змінного струму. Ефективність використання цих систем зазвичай пов'язують з визначенням параметрів та управлінням енергетичними процесами, що забезпечує максимальне споживання енергії зі зменшенням споживання з мережі. За цього перспективним виглядає використання управління за прогнозом.

Удосконалення фотоелектричних систем стосується забезпечення максимального споживання енергії за використання прогнозу фотоелектричної генерації та управління попитом з врахуванням тарифікації оплати. За цього важливим є забезпечення максимальної продуктивності фотоелектричного масиву в умовах затінення. Для розробки та дослідження систем з відновлювальними джерелами енергії поширеною практикою є використання математичного моделювання.

Таким чином, тема дисертаційної роботи Кругляка Геннадія Віталійовича, що присвячена покращенню показників систем електроживлення з відновлювальними джерелами енергії, є актуальною.

Оцінка обґрунтованості наукових результатів дисертації, їх достовірності та новизни.

Наукова новизна результатів дисертаційного дослідження полягає в наступному:

1. Запропоновано модель руху смуги часткового затінення фотоелектричного масиву з урахуванням напрямку та швидкості руху хмар за використання покадрових шаблонів затінення з їхньою інтерполяцією, що підвищує точність моделювання зміни радіації для елементів масиву.

2. Встановлено, що швидкість руху смуги затінення не впливає на енергетичну продуктивність фотоелектричного масиву, що дозволяє поширити отримані рекомендації і на статичні режими затінення.

3. Удосконалено математичну модель фотоелектричного масиву для дослідження різних його конфігурацій в процесі руху смуги затінення за рахунок програмної обробки даних з визначенням траєкторії руху глобального максимуму потужності, що дозволяє визначити енергетичні характеристики та можливості відстеження максимуму потужності.

4. Отримав розвиток варіант управління фотоелектричною системою з перемиканням навантаження до мережі на визначених інтервалах часу та зміною алгоритму за прогнозом, що за рахунок зменшення пікового попиту забезпечує можливість зниження витрат на електроенергію за тризонної тарифікації. Введення релейного регулювання потужності фотоелектричної батареї за відсутності регулювання в MPPT-контролері забезпечує баланс енергії в разі надлишкової генерації.

5. Отримав розвиток метод експериментальних досліджень у добовому циклі засобів управління фотоелектричними системами з використанням програмно керованих емулятора фотоелектричної батареї та навантаження з масштабуванням за потужністю та в часі. Це поряд з прискоренням експерименту дозволяє оцінювати ефективність випробуваних систем за різних співвідношень параметрів систем і коригувати алгоритми функціонування.

6. Отримала розвиток структура моделі фотоелектричного масиву з використанням наборів шаблонів затінення, що дозволяє досліджувати енергетичні показники для різних напрямів та швидкості руху смуги затінення.

7. Отримав розвиток принцип формування конфігурацій масивів фотоелектричних панелей для різних потужностей фотоелектричних систем з обмеженням кількості рядів та кількості панелей в рядку, що дозволяє підвищити продуктивність масиву незалежно від напрямку руху смуги затінення без підвищення вимог до алгоритму відстеження точки максимальної потужності.

Достовірність та обґрунтованість отриманих наукових результатів забезпечується використанням методів аналізу електричних кіл, результатами експериментальних досліджень, проведених в середовищі Matlab Simulink. Питання реалізації базувалось на відомих структурах управління та рішеннях комерційних інверторів. Основні наукові результати щодо реалізації управління енергоспоживанням підкріплені експериментальними дослідженнями та випробуваннями.

Наукові дослідження були виконані здобувачем на кафедрі комп'ютерної інженерії та електромеханіки Київського національного університету технологій та дизайну. Матеріали роботи використано під час виконання науково-дослідних робіт: держбюджетної науково-дослідної роботи «Розроблення системи енергоефективного управління мікроенергетичними мережами локальних об'єктів с традиційними та поновлювальними джерелами» (№ держреєстрації 0118U000232); науково-дослідної роботи за договором № ДЗ/92-2019 «Розроблення програмно-технічного комплексу управління електроспоживанням у системах енергоменеджменту локальних об'єктів» (№ держреєстрації 0119U103640).

Отже, поставлене в дисертаційній роботі науково-практичне завдання підвищення рівня споживання фотоелектричної енергії з управлінням за прогнозом генерації фотоелектричної енергії та в умовах часткового затінення є вирішеним, а здобувач повною мірою оволодів методологією наукової діяльності.

Оцінка змісту дисертації, її завершеність та дотримання принципів академічної доброчесності.

За своїм змістом дисертаційна робота здобувача Кругляка Г. В. повністю відповідає освітньо-науковій програмі спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка» (сертифікат про акредитацію освітньої програми № 4576 від 02.06.2023).

Дисертаційна робота є завершеною науковою працею за наявності особистого внеску здобувача у науковий напрям «Енергетика та енергоефективність».

Аналіз звіту подібності щодо результатів перевірки тексту дисертації дозволяє зробити висновок про те, що дисертаційна робота Кругляка Геннадія Віталійовича є результатом самостійних досліджень здобувача і не містить елементів фальсифікації, компіляції, фабрикації, плагіату та запозичень. Використані ідеї, результати і тексти інших авторів мають належні посилання на відповідне джерело.

Мова та стиль викладення результатів.

Дисертаційна робота написана українською мовою з використанням загальноприйнятої сучасної наукової термінології. Зміст дисертації є добре структурованим та цілісним, робота відповідає темі досліджень.

Дисертація складається з вступу, чотирьох розділів, висновків, списку літератури із 179 найменувань та 4 додатків. Загальний обсяг дисертації 209 сторінок.

У вступі наведено актуальність теми дисертаційної роботи, поставлено мету та задачі дослідження, наведено практичну та наукову новизну отриманих

результатів. Також наведено основну інформацію про публікації та апробацію результатів дисертаційної роботи.

У першому розділі роботи проведено аналіз існуючих рішень та розробок гібридних фотоелектричних систем. Показано, що вдосконалення фотоелектричних станцій стосується підвищення рівня споживання фотоелектричної енергії на власні потреби. Перспективні рішення стосуються управління енергоспоживанням з використанням прогнозу. Проаналізовано функціональні можливості комерційних гібридних інверторів та обґрунтовано доцільність розробки додаткових програмно-технічних комплексів для інтелектуального управління попитом.

Показано, що для перевірки ефективності алгоритмів управління на стадії розробки апаратних і програмних рішень доцільним є застосування напівпровідникових емуляторів для розширення можливостей експериментальних досліджень програмно-технічного комплексу.

Відзначено два основних шляхи мінімізації впливу часткового затінення на енергетичну продуктивність фотоелектричного масиву: вдосконалення MPPT-контролерів та реконфігурації масивів. Дослідження часто базуються на спрощених статичних сценаріях з неповним врахуванням реальної фізики та руху тіні. Виконано аналіз методів математичного моделювання в середовищі MATLAB/Simulink та засобів експериментальної перевірки з використанням емуляторів сонячних батарей.

На основі критичного огляду літератури сформульовано завдання роботи.

У другому розділі розглянуто алгоритми та засоби управління енергоспоживанням локального об'єкта з фотоелектричною системою та акумуляторним накопичувачем на основі прогнозу сонячної генерації. Обґрунтовано та реалізовано алгоритми функціонування програмно-технічного комплексу спільно зі стандартним гібридним інвертором в умовах тризонної тарифікації. Запропоновані сценарії прогнозного управління та вибору параметрів навантаження дозволяють знизити витрати на електроенергію і підвищити енергоефективність локальних об'єктів з фотоелектричними системами. Зокрема, з використанням гібридних інверторів без режиму паралельної роботи з мережею.

Обґрунтовано сценарії управління та вибір рекомендованого графіка навантаження згідно прогнозу, який передбачає перерозподіл споживання в передпікові години для максимального заряду акумуляторної батареї. Розглянуто можливість застосування релейного регулювання потужності фотопанелей для забезпечення балансу енергії в режимах надлишкової генерації. Виконано імітаційне моделювання енергетичних процесів у середовищі MATLAB/Simulink, що підтвердило ефективність запропонованих рішень. З урахуванням отриманих результатів розроблено структуру

програмно-технічного комплексу на базі мікроконтролерів ATmega та ESP8266, інтегрованого з веб-ресурсами для отримання метеопрогнозів.

Результати підтверджують, що прогнозне управління забезпечує можливість зниження витрат на електроенергію до 29% та сприяє подовженню терміну експлуатації акумуляторів

Третій розділ присвячений визначенню конфігурацій фотоелектричних масивів, за мінімального впливу часткового затінення на енергетичну продуктивність. Обґрунтовано методику моделювання динаміки руху хмарності з урахуванням умов Київського регіону влітку. Розроблено цифрові шаблони, що описують геометрію затінення під різними кутами до фронту масиву, із застосуванням Гаусового згладжування.

Запропоновано комплексну математичну модель фотоелектричного масиву в середовищі MATLAB/Simulink з механізмом паралельних обчислень на ядрах процесора. Це забезпечує можливість проведення аналізу великих масивів даних та оцінки динаміки зміни енергетичних характеристик фотоелектричних масивів. Розглянуто вплив різних конфігурацій з'єднань на енергетичні показники та траєкторії руху точок глобального максимуму потужності, що є критично важливим для коректної роботи MPPT-контролерів комерційних інверторів. Доведено, що швидкість переміщення тіньової смуги не чинить суттєвого впливу на сумарну генерацію енергії.

За результатами моделювання сформульовані рекомендації щодо з'єднань панелей в масиві задля мінімізації впливу затінення на енергетичні показники.

Запропоновано варіанти дво- та трирядних топологій масивів для систем потужністю 3 – 10 кВт. Показано, що впровадження рекомендованих схем з'єднань дозволяє знизити неузгоджені втрати до 20,2% та підвищити фактор заповнення на 9,9%. Приріст сумарної генерації енергії становить до 8% порівняно зі стандартними класичними паралельно-послідовними масивами.

У четвертому розділі наведено результати експериментальних досліджень та практичної реалізації розроблених алгоритмів управління фотоелектричними системами. Обґрунтовано структуру експериментальної установки, що базується на використанні стандартного гібридних інвертора та напівпровідникового емулятора фотоелектричної батареї з програмним керуванням. Це дозволяє проводити випробування в реальному часі за різних сценаріїв генерації та навантаження.

Розвинуто метод експериментальних досліджень у добовому циклі з можливістю масштабування за потужністю та часом. Це надає можливість оцінювання ефективності запропонованих рішень за різних співвідношень параметрів системи та корегування алгоритмів функціонування на апаратному рівні. Розроблено структуру та схемні рішення щодо реалізації програмно-технічного комплексу управління енергоспоживанням, який є сумісним із комерційними інверторами та інтегрується з відкритими веб-ресурсами для

отримання прогнозів генерації. Показано результати тестування дослідного зразка комплексу, в ході яких підтверджено його функціональну працездатність відповідно до умов проведення випробувань.

Результати випробувань підтверджують адекватність розроблених математичних моделей та високу ефективність алгоритмів прогнозного управління, що розширює умови для практичного впровадження інтелектуальних систем енергозабезпечення локальних об'єктів.

Дисертаційна робота оформлена відповідно до вимог наказу МОН України від 12 січня 2017 р. № 40 «Про затвердження вимог до оформлення дисертації».

Оприлюднення результатів дисертаційної роботи.

Наукові результати дисертації висвітлені у 6 наукових публікаціях здобувача, серед яких: 4 статті у наукових фахових виданнях, 2 статті у виданнях, що входять до міжнародних науко-метричних баз Scopus та/або Web of Science Core Collection.

Також результати дисертації були апробовані на 5 наукових фахових конференціях.

У наукових публікаціях здобувача якісно та на високому науковому рівні висвітлені результати його дисертаційного дослідження. Порушень правил академічної доброчесності та наявності запозичень в даних публікаціях не виявлено.

Таким чином, наукові результати описані в дисертаційній роботі повністю висвітлені у наукових публікаціях здобувача.

Недоліки та зауваження до дисертаційної роботи.

Є ряд зауважень щодо подання результатів в роботі:

1. Не розшифровано позначення *DoD* (27 стор.), *SoC* (стор.29)
2. Стор. 53 - немає визначення Δt_{56} .
3. Не вдало розподілення рис.3.1 на два з продовженням.
4. На стор.72 «Для отримання максимально можливої потужності генерації $P_{PVM}=10400$ Вт складено 12 можливих конфігурацій ФЕМ з 16 ФЕП». У висновках на стор.123 «для трирядних конфігурацій (від 2x4 до 3x8), які охоплюють діапазон потужностей 3-10 кВт». Конфігурація 3x8 має 24 ФЕП, чому 10 кВт?
5. На стор.109 на рис.3.22 відсутні вісі, що ускладнює сприймання кількісних показників.
6. Таблиця 3.5 занадто деталізована для всіх конфігурацій – доречніше було б навести показники для найкращого та найгіршого варіантів.

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

Висновок про дисертаційну роботу.

Вважаю, що дисертаційна робота здобувача ступеня доктора філософії Кругляка Геннадія Віталійовича на тему «Підвищення рівня споживання фотоелектричної енергії в системі електроживлення локального об'єкту» виконана на високому науковому рівні, не порушує принципів академічної доброчесності та є закінченим науковим дослідженням, сукупність теоретичних та практичних результатів якого розв'язує наукове завдання, що має істотне значення для галузі 14 «Електрична інженерія». Дисертаційна робота за актуальністю, практичною цінністю та науковою новизною повністю відповідає вимогам чинного законодавства України, що передбачені в п. 6–9 «Порядку присудження ступеня доктора філософії та скасування рішення разової спеціалізованої вченої ради закладу вищої освіти, наукової установи про присудження ступеня доктора філософії», затвердженого Постановою Кабінету Міністрів України від 12 січня 2022 р. № 44.

Здобувач Кругляка Геннадій Віталійович заслуговує на присудження ступеня доктора філософії в галузі знань 14 «Електрична інженерія» за спеціальністю 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка».

Рецензент:

Доцент кафедри комп'ютерної інженерії та електромеханіки
Київського національного університету технологій та дизайну,

к.т.н., доц.

Демішнкова Світлана ДЕМИШОНКОВА

М.П.

«23» 07 2026 року

