

РЕЦЕНЗІЯ

кандидата технічних наук, доцента,
завідувача кафедри комп'ютерної інженерії та електромеханіки
Київського національного університету технологій та дизайну
Дмитра Володимировича СТАЦЕНКО
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.

Відновлювальні джерела енергії багато в чому визначають майбутнє енергетики та забезпечують сталий розвиток людства. Однак очевидні і проблеми у використанні фотоелектричних систем, пов'язані з нерівномірністю генерації електроенергії. Окремим блоком стоять питання застосування фотоелектричних систем для забезпечення власних потреб локальних об'єктів, коли генерація електроенергії в мережу не передбачена.

Питання удосконалення фотоелектричної системи відноситься до вирішення комплексу задач. Питання управління пов'язані з використанням прогнозу фотоелектричної генерації з забезпеченням рівномірності споживання енергії з мережі зі зниженням пікового попиту, максимального використання фотоелектричної енергії на споживання. В умовах можливого часткового затінення фотоелектричного масиву необхідно забезпечити його максимальну енергетичну продуктивність. Важливим є питання вдосконалення інструменту розробки та дослідження систем, в якості якого розглядається математичне моделювання.

Таким чином, тема дисертаційної роботи Кругляка Геннадія Віталійовича, що присвячена покращенню показників систем 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 3 відсутності регулювання в MPPT-контролері забезпечує баланс енергії в разі надлишкової генерації.

5. Отримав розвиток метод експериментальних досліджень 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 загальноприйнятими апробованими методами аналізу електричних кіл, імітаційним моделюванням у програмному середовищі MATLAB/Simulink, експериментальною апробацією дослідного зразка. При створенні моделей, зокрема, фотоелектричної панелі оцінювалось наближення до характеристик виробника.

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: «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, в дисертаційній роботі вирішується науково-прикладна задача удосконалення підключених до мережі фотоелектричних систем з акумуляторними батареями для потреб локальних об'єктів з управлінням за прогнозом сонячної генерації та підвищенням енергетичної продуктивності фотоелектричного масиву в умовах часткового затінення. Здобувач повною мірою оволодів методологією наукової діяльності.

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

За своїм змістом дисертаційна робота здобувача Кругляка Геннадія Віталійовича повністю відповідає освітньо-науковій програмі спеціальності «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка» (сертифікат про акредитацію освітньої програми в Київському національному університеті технологій та дизайну № 4576 від 02.06.2023).

Дисертаційна робота є завершеною науковою працею і свідчить про наявність 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 додатків. Загальний обсяг дисертації 209 сторінок.

У вступі проведено обґрунтування актуальності 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 проведено аналіз сучасного стану та існуючих рішень щодо реалізації гібридних фотоелектричних систем для енергозабезпечення локальних об'єктів. За цього основною тенденцією щодо вдосконалення фотоелектричних станцій є підвищення рівня споживання фотоелектричної енергії на власні потреби. Важливим фактором підвищення є управління енергоспоживанням за прогнозом.

Проаналізовано функціональні можливості комерційних гібридних інверторів та обґрунтовано доцільність розробки додаткових програмно-технічних комплексів для управління енергоспоживанням. Показано доцільність застосування напівпровідникових емуляторів для розширення можливостей експериментальних досліджень програмно-технічного комплексу для перевірки ефективності алгоритмів управління на стадії розробки апаратних і програмних рішень.

Виконано аналіз розробок щодо мінімізації впливу часткового затінення на енергетичну продуктивність фотоелектричного масиву. Показано, що поряд з вдосконаленням MPPT-контролерів розробляються стратегії реконфігурації,

дослідження яких часто базуються на спрощених статичних сценаріях з неповним врахуванням реальної фізики та динаміки руху тіні.

Виконано аналіз методів математичного моделювання в середовищі MATLAB/Simulink та засобів експериментальної перевірки з використанням емуляторів сонячних батарей.

Для підвищення загальної енергоефективності локальних фотоелектричних систем на основі критичного огляду літератури сформульовано завдання роботи.

У другому розділі розглянуто розробку алгоритмів та засобів управління енергоспоживанням локального об'єкта з фотоелектричною системою та акумуляторним накопичувачем на основі прогнозу сонячної генерації. Обґрунтовано алгоритми функціонування програмно-технічного комплексу спільно зі стандартним гібридним інвертором в умовах тризонної тарифікації.

Запропоновані сценарії прогнозного управління та вибору параметрів навантаження, що дозволяють знизити витрати на електроенергію і підвищити самоспоживання фотоелектричної енергії. Це можливо з використанням гібридних інверторів без режиму паралельної роботи з мережею. Обґрунтовано визначення параметрів сценаріїв управління та вибір рекомендованого графіка навантаження, який передбачає перерозподіл споживання в передпікові години для максимального заряду акумуляторної батареї. Розглянуто можливість застосування релейного регулювання потужності фотогенерації для забезпечення балансу енергії в режимах надлишкової генерації.

Імітаційне моделювання енергетичних процесів у середовищі MATLAB/Simulink 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 прогнозів. Показано, що впровадження прогнозного управління забезпечує можливість зниження витрат на електроенергію до 29% та сприяє подовженню терміну експлуатації акумуляторів.

Третій розділ присвячений визначенню конфігурацій фотоелектричного масиву, яким притаманний мінімальний вплив часткового затінення. Обґрунтовано методику моделювання руху хмарності з урахуванням умов Київського регіону влітку. Для підвищення адекватності моделювання розроблено цифрові шаблони, що описують геометрію затінення під різними кутами до фронту масиву, із застосуванням Гаусового згладжування для відтворення реальних розмитих меж тіні.

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 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 смуги затінення не чинить суттєвого впливу на сумарну генерацію енергії. Це дає змогу виключити фактор швидкості вітру з переліку параметрів, що визначають точність оцінювання енергетичних

показників. За результатами моделювання визначені показники для типових паралельно-послідовних конфігурацій масивів, що дозволило визначити рекомендації для розробки конфігурацій з мінімальним впливом затінення на показники.

Запропоновано варіанти дво- та трирядних топологій 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.

Четвертий розділ присвячений експериментальним дослідженням та практичній реалізації розроблених рішень щодо управління фотоелектричними системами. Обґрунтовано структуру експериментальної установки, що базується на використанні стандартного гібридних інвертора та напівпровідникового емулятора фотоелектричної батареї з програмним керуванням. Це дозволило проводити випробування в реальному часі за різних сценаріїв генерації та навантаження, мінімізуючи часові та матеріальні витрати.

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 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. Порухів 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.

Присутні деякі зауваження стосовно викладення результатів:

1. Стор.57. Невдало введено позначення сценаріїв SC1-SC3, що дублює позначку самоспоживання SC (стор.26).

2. На блок-схемах рис.2.8 і рис. 2.9 пояснено не всі точки переходів.

3. В п.3.2.3 під час обґрунтування методики моделювання руху смуги затінення «в літні місяці в Київському регіоні має місце вітер у межах північно-західного сектора». В П.9 загальних висновків «Запропоновано модель руху смуги часткового затінення Розроблені шаблони затінення для напрямків руху з кутами до фронту масиву: 0°, 14°, 27°, 45°, 63° та 76°». Тобто розгляд щодо напрямків розширено. Для чого?

4. Стор.89 шаблон затінення (рис.3.12, а) має 16 стовпчиків і 9 рядків. На рис.3.12,б) - 12 рядків. Чому, не пояснюється.

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

Рецензент:

Завідувач кафедри

комп'ютерної інженерії та електромеханіки

Київського національного університету технологій та дизайну,

к.т.н., доц.

 Дмитро СТАЦЕНКО

М.П. « 23 » 07 2026 року

