

ВІДГУК

кандидата технічних наук, завідувача кафедри електричної інженерії
ДВНЗ «Донецький національний технічний університет»

Олександра Юрійовича КОЛЛАРОВА

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 обраної теми дисертаційного дослідження

Важливим напрямом в світовій енергетиці зараз є використання відновлюваних джерел енергії, як шлях до екологічної безпеки. Широке впровадження відновлювальної енергетики має місце в «малій» енергетиці на рівні локальних об'єктів різноманітного призначення. За цього розповсюдженням є використання підключених до мережі фотоелектричних систем з акумуляторами для забезпечення власних потреб локальних об'єктів. Подальше удосконалення цих рішень пов'язано з управлінням енергоспоживанням за прогнозом генерації фотоелектричної енергії. Поряд з питанням максимального ступеню споживання фотоелектричної енергії важливим є забезпечення максимальної продуктивності фотоелектричного масиву в умовах часткового затінення. В разі розташування на даху це зумовлено хмарністю.

Таким чином, тема дисертаційної роботи Кругляка Геннадія Віталійовича, що присвячена питанням підвищення рівня споживання фотоелектричної енергії для потреб локального об'єкту, є актуальною науково-технічною задачею.

Ступінь обґрунтованості та достовірності наукових положень, висновків і рекомендацій

Наукова новизна результатів дисертаційного дослідження полягає в наступному:

1. Запропоновано математичну модель руху смуги часткового затінення фотоелектричного масиву. Вона враховує напрям та швидкість руху хмар шляхом використання покадрових шаблонів затінення з їх інтерполяцією, що підвищує точність відтворення динаміки сонячної радіації для окремих елементів масиву

2. Встановлено, що швидкість руху смуги затінення не має визначального впливу на сумарну енергетичну продуктивність масиву. Це дозволяє поширити

отримані рекомендації щодо конфігурування систем і на статичні режими затінення.

3. Удосконалено математичну модель фотоелектричного масиву для дослідження його конфігурацій за умов динамічного затінення. Завдяки програмній обробці даних із побудовою траєкторії глобального максимуму потужності стає можливим оцінювання енергетичних характеристик та ефективності алгоритмів відстеження точки екстремуму.

4. Дістав подальшого розвитку метод управління фотоелектричною системою, що поєднує перемикання навантаження на мережу в задані інтервали часу та адаптацію алгоритму за прогнозом генерації. Це дозволяє знизити піковий попит та мінімізувати витрати на електроенергію за умов тризонної тарифікації. Впровадження релейного регулювання потужності забезпечує баланс енергії при надлишковій генерації навіть за відсутності функції регулювання у MPPT- контролері.

5. Дістав подальшого розвитку метод експериментальних досліджень систем управління у добовому циклі. Використання програмно керованих емуляторів масиву та навантаження з масштабуванням у часі й за потужністю дозволяє прискорити випробування, оцінювати ефективність алгоритмів за різних експлуатаційних сценаріїв, коригувати алгоритми функціонування.

6. Розроблено структуру імітаційної моделі масиву, яка базується на наборах динамічних шаблонів. Це дозволяє проводити комплексні дослідження енергетичних показників системи для довільних комбінацій векторів руху та геометричних параметрів зони затінення

7. Дістав подальшого розвитку принцип формування конфігурацій фотоелектричних масивів різної потужності з обмеженням розмірності рядів та панелей. Це забезпечує підвищення продуктивності системи за будь-якого напрямку руху тіні, не вимагаючи при цьому ускладнення алгоритмів відстеження точки максимальної потужності..

В процесі дослідження використані теоретичні методи теорії електричних кіл, алгоритм синтезу динамічних цифрових шаблонів із застосуванням Гаусового згладжування, комп'ютерне моделювання. Достовірність та обґрунтованість наукових результатів підкріплені експериментальними дослідженнями в лабораторії та випробуванням дослідного зразка на діючій фотоелектричній системі, а також дослідженнями з використанням програмного пакету MATLAB/Simulink, що забезпечує високу якість і надійність отриманих даних.

Отже, поставлене в дисертаційній роботі науково-практичне завдання щодо підвищення ступеню використання фотоелектричної енергії на споживання локальним об'єктом в разі управління за прогнозом фотоелектричної генерації та підвищення енергетичної продуктивності

фотоелектричного масиву в умовах часткового затінення, виконано повністю, а здобувач повною мірою оволодів методологією наукової діяльності.

Структура і зміст дисертаційної роботи. Відповідність дисертації встановленим вимогам

За змістом дисертаційна робота здобувача Кругляка Геннадія Віталійовича повністю відповідає освітньо-науковій програмі спеціальності 141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка (сертифікат про акредитацію освітньої програми № 4576 від 02.06.2023) галузі знань 14 Електрична інженерія.

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

Розглянувши звіт подібності за результатами перевірки дисертаційної роботи на текстові співпадіння, можна зробити висновок, 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 загальноприйнятою науковою мовою з використанням актуальної наукової термінології. Зміст роботи має чітку структуру та цілісність, і повністю відповідає обраній темі дослідження.

Дисертація містить вступ, чотири розділи, висновки, список літератури із 179 найменувань та додатки. Загальний обсяг дисертації 209 сторінок.

У вступі до дисертації обґрунтовано її актуальність, визначено мету та завдання дослідження, описано використані методи, а також представлено наукову новизну та практичну цінність отриманих результатів. Також висвітлено публікацію результатів у наукових виданнях і апробацію на конференціях, зазначено особистий вклад автора та використання роботи в навчальному процесі.

Перший розділ роботи містить аналіз існуючих рішень щодо реалізації гібридних фотоелектричних систем для енергозабезпечення локальних об'єктів. 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 інтелектуального управління попитом. Показано доцільність застосування напівпровідникових емуляторів для розширення

можливостей експериментальних досліджень програмно-технічного комплексу, що забезпечує повторюваність умов 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. Поряд з вдосконаленням МРРТ-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.

Виконаний аналіз дозволив сформулювати завдання для розв'язання в дисертаційній роботі.

У другому розділі розглянуто розробку алгоритмів та засобів управління енергоспоживанням локального об'єкта з фотоелектричною системою та акумуляторним накопичувачем на основі прогнозу фотоелектричної 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 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 фотоелектричних панелей для забезпечення балансу енергії в режимах надлишкової генерації.

Виконано аналіз та імітаційне моделювання енергетичних процесів у середовищі MATLAB/Simulink. З урахуванням отриманих результатів розроблено структуру програмно-технічного комплексу на базі мікроконтролерів ATmega та ESP8266, інтегрованого з веб-ресурсами для отримання даних прогнозу. Результати підтверджують, що впровадження прогнозного управління забезпечує можливість зниження витрат на електроенергію до 29% та сприяє подовженню терміну експлуатації акумуляторів.

Третій розділ присвячений підвищенню енергетичної продуктивності фотоелектричних масивів за умов динамічного часткового затінення. Застосовано математичне моделювання енергетичних процесів. Обґрунтовано методику моделювання динаміки 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 динаміки зміни енергетичних характеристик фотоелектричних масивів. Розглянуто вплив затінення на енергетичні показники та траєкторії руху точок глобального максимуму потужності для різних конфігурацій з'єднань, що є критично важливим для коректної роботи МРРТ-контролерів комерційних інверторів. Доведено, що швидкість переміщення тіньової смуги не чинить суттєвого впливу на сумарну генерацію енергії. Це дає змогу виключити фактор швидкості вітру з переліку параметрів, що визначають точність оцінювання енергетичних показників. На підставі аналізу визначено рекомендації щодо зменшення впливу затінення.

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 алгоритмів управління фотоелектричними системами. Обґрунтовано структуру експериментальної установки, що базується на використанні стандартного гібридних інвертора та напівпровідникового емулятора фотоелектричної батареї з програмним керуванням. Такий підхід дозволив 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 згідно вимогам враховуються: 6 статей у наукових виданнях, включених на дату опублікування до переліку наукових фахових видань України, з них 2 статті у виданнях, що входять до міжнародних наукометричних баз Scopus. Також результати дисертації були апробовані на 5 наукових фахових конференціях.

Відзначу, що результати дисертаційної роботи достатньо повно відображені автором у його наукових публікаціях. Вказаний особистий внесок здобувача в сумісних публікаціях свідчить, що він є автором вище перелічених отриманих наукових результатів. Порушень правил академічної доброчесності не виявлено.

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

Недоліки та зауваження до дисертаційної роботи.

До недоліків, які не знижують загальної високої оцінки роботи, слід віднести:

1. Наведено 7 пунктів нових наукових результатів. Пункт 6 «Отримала розвиток структура моделі фотоелектричного масиву з використанням наборів шаблонів затінення...» за суттю є складовою пункту 3.

2. Недоречні скорочення в змісті роботи – ПТК, ФЕС.

3. На стор. 26 використано позначення E_{SC} — річний або місячний обсяг самоспожитої енергії, далі енергію позначено як W_{PV} , W_L .

4. Пункт 1.4 формулювання завдань роботи «Використання прогнозу з відкритих веб-ресурсів сприятиме уніфікації рішень в разі використання стандартних комерційних гібридних інверторів» не сприймається як завдання дослідження.

5. На стор. 119 «...систематизований аналіз результатів моделювання розроблених геометричних конфігурацій ФЕМ та їх порівняння з класичними послідовно-паралельними схемами». Використані некоректні формулювання - систематизований аналіз і класичні схеми.

6. На стор. 94 «За час проходження смуги затінення» – не зовсім зрозуміло, що мається на увазі? Як визначається цей час?

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».

Офіційний опонент:

Завідувач кафедри електричної інженерії
ДВНЗ «Донецький національний технічний університет»
(м. Дрогобич Львівської області)

канд. техн. наук, доцент

Олександр КОЛЛАРОВ

М.П.

«22» липня 2026 року

Підпис завідувача кафедри електричної інженерії ДВНЗ «Донецький національний технічний університет» кандидата техн. наук, доцента

Олександра КОЛЛАРОВА

Засвідчую:
Начальник



Віта СІМОЕН
22.07.2026