

ВІДГУК

доктора технічних наук, професора, професора кафедри електронних пристроїв та систем Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Валерія Яковича ЖУЙКОВА

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.

Розвиток енергетичного сектору України та загалом сучасний тренд у світовій енергетиці характеризуються широким впровадженням відновлюваних джерел енергії у всі сфери життєдіяльності. Це сприяє екологічній безпеці та створенню децентралізованих (локальних) систем електроживлення зі зменшенням залежності від загальних розподільчих мереж. В кінцевому результаті це підвищує енергетичну безпеку. Використання відновлювальних джерел електроенергії, зокрема фотоелектричних систем, стає розповсюдженим і для систем електроживлення локальних об'єктів приватного сектору. За цього споживач отримує підвищення рівня надійності електропостачання, для енергосистеми спрощується питання балансу потужності.

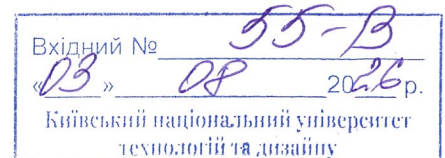
За цього сучасний напрям розвитку малої енергетики орієнтований на локалізацію використання електроенергії в місцях її генерації за мінімуму експорту в мережу. Розповсюдженим є використання підключених до мережі гібридних фотоелектричних систем з акумуляторами. Підвищення їх ефективності пов'язано з вирішенням питань максимального споживання фотоелектричної енергії разом із забезпеченням максимальної продуктивності в умовах затінення. Певні можливості дає управління енергоспоживанням за прогнозом генерації фотоелектричної батареї та визначення «стійких» до можливого затінення конфігурацій фотоелектричних масивів.

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

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 врахуванням напрямку та швидкості руху хмар за



використання покадрових шаблонів затінення з їхньою інтерполяцією, що підвищує точність відтворення 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 глобального максимуму потужності, що дозволяє визначити енергетичні характеристики та можливості відстеження максимуму потужності.

4. Розвинуто 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 оплати. Введення релейного регулювання потужності фотоелектричної батареї за відсутності регулювання в MPPT контролері забезпечує баланс енергії в разі надлишкової генерації.

5. Розвинуто метод експериментальних досліджень у добовому циклі засобів управління фотоелектричними системами з використанням програмно керованих емулятору 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. Розвинуто структуру моделі фотоелектричного масиву з використанням наборів шаблонів затінення, що дозволяє досліджувати енергетичні показники для різних напрямів та швидкості руху смуги затінення.

7. Розвинуто рекомендації щодо формування конфігурацій масивів з 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.

Дослідження базуються на використанні загальноприйнятих апробованих методів аналізу електричних кіл, імітаційного моделювання у програмному середовищі MATLAB/Simulink та експериментальній апробації дослідного зразка. Реалізація базувалась на відомих структурах управління.

Достовірність та обґрунтованість наукових результатів підкріплені експериментальними дослідженнями та випробуваннями, дослідженнями, проведеними в загально прийнятому для цього класу завдань середовищі MATLAB/Simulink, що забезпечує високу якість і надійність отриманих даних.

Отже, поставлене в дисертаційній роботі науково-практичне завдання підвищення ступеню використання фотоелектричної енергії на споживання при підтриманні максимальної продуктивності фотоелектричного масиву зі зменшенням витрат на електроенергію виконано повністю, 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 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 і свідчить про наявність 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 складається з вступу, чотирьох розділів, висновків, списку літератури із 179 найменувань та додатків. 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 ННІ енергетики, автоматики і енергозбереження НУБіП України.

В першому розділі роботи проведено аналіз сучасного стану та існуючих рішень щодо реалізації гібридних фотоелектричних систем для енергозабезпечення локальних об'єктів. Показано, що 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 енергоспоживанням. Показано доцільність застосування напівпровідникових емуляторів для розширення можливостей експериментальних досліджень програмно-технічного комплексу 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 масивів, 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.

На підставі виконаного аналізу сформульовано завдання для вирішення.

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 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 фотопанелей для забезпечення балансу енергії в режимах надлишкової генерації.

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

Третій розділ присвячено визначенню конфігурацій фотоелектричного масиву, які забезпечують мінімальний вплив затінення на енергетичну продуктивність. 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 різних конфігурацій з'єднань на енергетичні показники та траєкторії руху точок глобального максимуму потужності. Доведено, що швидкість переміщення тіньової смуги не чинить суттєвого впливу на сумарну генерацію енергії.

На базі досліджень впливу затінення для різних конфігурацій масивів сформульовані рекомендації щодо мінімізації впливу затінення. Запропоновано варіанти дво- та трирядних топологій. 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 гібридного 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.

Розвинуто метод експериментальних досліджень 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 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 враховуються: 4 статті у наукових виданнях, включених на дату опублікування до переліку наукових фахових видань України, 2 статті у виданнях, які входять до міжнародних науко-метричних баз Scopus та/або Web of Science Core Collection.

Також результати дисертації були апробовані на 5 наукових фахових конференціях.

Проведений аналіз наукових праць здобувача показав, 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. Дуже довге, важке для сприймання формулювання 4 в наукових результатах: «Отримав розвиток варіант управління фотоелектричною системою з перемиканням навантаження до мережі на.....».

2. Забагато задач (9) для вирішення, доцільно б було їх укрупнити, наприклад завдання 4 і 9 стосуються експериментального зразку ПТК, 5 і 6 моделі масиву фотоелектричних панелей

3. В разі визначення впливу швидкості руху смуги затінення розглянуто кратність швидкості 1, 2, 3, 4. Відсутній зв'язок з абсолютними значеннями в м/с.

4. Стор. 52. Для визначення стану заряду використано позначення Q^* , чи є воно еквівалентно позначенню SoC , яке використовувалось раніше (стор.29).

5. Дослідження щодо визначення конфігурацій масиву базується на вивченні властивостей відомих конфігурацій за допомогою віртуального експерименту – моделювання. Доречно було б сформулювати методологію цього.

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

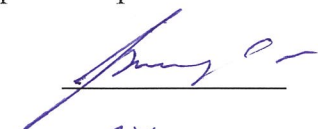
Вважаю, що дисертаційна робота здобувача ступеня доктора філософії Кругляка Геннадія Віталійовича на тему «Підвищення рівня споживання фотоелектричної енергії в системі електроживлення локального об'єкту» виконана на високому науковому рівні, не порушує принципів академічної доброчесності та є закінченим 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».

Офіційний опонент:

Професор кафедри електронних пристроїв та систем
Національного технічного університету
України "Київський політехнічний
університет імені Ігоря Сікорського"

д.т.н., проф.

 Валерій ЖУЙКОВ
«27» липень 2026 року

М.П.

