

РЕЦЕНЗІЯ

на дисертаційну роботу

Хомяка Андрія Олеговича на тему «Інтелектуальна система регулювання режимів роботи сонячної електростанції»,
представлену на здобуття ступеня доктора філософії
в галузі знань 14 Електрична інженерія
за спеціальністю 141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка

Актуальність теми дисертації.

Дисертаційне дослідження «Інтелектуальна система регулювання режимів роботи сонячної електростанції» присвячено важливому науковому завданню підвищення енергоефективності енергосистеми України. У роботі розроблено моделі та методи для моніторингу, прогнозування і контролю, спрямовані на зміцнення енергетичної стійкості країни. Основну увагу приділено сонячним електростанціям як ключовим джерелам відновлюваної енергії.

У роботі досліджуються різні аспекти функціонування сонячних електростанцій, включаючи технічні, економічні та екологічні фактори. Окрему увагу приділено питанням оптимізації роботи електростанцій у режимах змінного навантаження та нестабільного постачання електроенергії. Запропоновано нові алгоритми для підвищення ефективності використання сонячної енергії, що допоможуть зменшити витрати на експлуатацію та підвищити надійність роботи системи.

Наукові результати дослідження можуть бути застосовані для вдосконалення існуючих технологій та розробки нових рішень у галузі відновлюваної енергетики, що сприятиме зменшенню викидів парникових газів та зниженню залежності від викопних видів палива. Таким чином, це дослідження має значний внесок у розвиток сталих енергетичних систем та є *важливим і актуальним*.

Оцінка обґрунтованості наукових результатів дисертації, їх достовірності та новизни.

Наукова новизна цього дослідження полягає у розробці методу для адаптації до змін у генерації електроенергії на сонячних електростанціях, який ґрунтується на короткостроковому прогнозуванні за допомогою інтелектуальних систем на основі нейронних мереж. Це дало змогу змінити підхід до балансування енергосистеми та знизити витрати завдяки використанню повільніших, але дешевших резервів відновлення частоти. Також було запропоновано новий математичний метод рангових коефіцієнтів узгодженості й критерії для багатокритеріального аналізу ефективності роботи електростанцій, що збільшило швидкість реагування диспетчерів на відхилення в енергосистемі шляхом ранжування сонячних електростанцій за їхньою ефективністю та впливом. Крім того, створено нейронну мережу для розпізнавання зображень Сонця та хмар і аналізу їхнього руху, що дозволяє прогнозувати значення генерації електроенергії на сонячних електростанціях у реальному часі з горизонтом прогнозування в 15 хвилин за допомогою згорткових нейронних мереж у середовищі Python.

Достовірність і обґрунтованість наукових результатів забезпечується використанням в якості вихідних даних деталізованих результатів наукових досліджень.

Наукові дослідження були виконані здобувачем на кафедрі автоматизації електротехнічних та мехатронних комплексів КПІ ім. Ігоря Сікорського під керівництвом д.т.н., професора Розена Віктора Петровича. Та впроваджені в освітній процес кафедри Автоматизації електротехнічних та мехатронних комплексів при викладанні дисциплін освітньо-професійної програми підготовки бакалаврів та магістрів «Інжиніринг інтелектуальних електротехнічних та мехатронних комплексів» за спеціальністю 141 – Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка» а саме: дисципліна «Інтелектуальні системи прийняття рішень», «Системна інтеграція сонячних електростанцій у розумні енергетичні системи (Smart Grid)».

У дисертаційній роботі було визначене наукове завдання підвищення енергоефективності енергосистеми України шляхом аналізу графіків генерації електроенергії на сонячних електростанціях, вивчення методів компенсації небалансів в енергосистемах Європи, а також зростання частки сонячних електростанцій в структурі генерації різних країн. Було розроблено алгоритми розрахунку ефективності роботи сонячних електростанцій, прогнозування змін генерації, передачі інформації від власника установки до оператора системи передачі. Також досліджено можливості підвищення стійкості та автономності роботи сонячних електростанцій шляхом встановлення УЗЕ та Grid-Forming інверторів, а також створено моделі моніторингу відхилень генерації, здобувач повною мірою оволодів методологією наукової діяльності.

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

За своїм змістом дисертаційна робота здобувача Хомяка А.О. повністю відповідає Стандарту вищої освіти зі спеціальності 141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка та напрямкам досліджень відповідно до освітньої програми «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка».

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 Хомяка Андрія Олеговича 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. Матеріал подано науковим стилем мовлення із присутністю логічної послідовності та доступністю викладення. В тексті застосовуються загальноприйнята термінологія у сферах «енергетика та енергоефективність» та «електрична інженерія».

Дисертація складається з анотації, 4 розділів, висновків до кожного розділу та окремо, списку літератури та 4 додатків. Загальний обсяг дисертації 249 сторінок.

В *анотації* розглянуто основні положення та результати дисертації.

У *першому* розділі розглянуто проблематику управління енергосистемою України під час військової агресії, прогнозування її розвитку, вплив відновлювальних джерел енергії на стійкість системи, впровадження нової Енергетичної стратегії до 2050 року, посилення ролі енергетичної безпеки та інтеграції в європейську енергетичну мережу, а також використання новітніх технологій. Описано нове програмне забезпечення GridOS від General Electric для аналізу та управління даними енергосистеми, яке планується до виходу у 2027 році.

У *другому* розділі виконано детальний аналіз роботи сонячної електростанції за період з 01.10.2022 по 27.09.2023, з урахуванням щохвилинних даних генерації електроенергії, які були переведені у відносні числа та усереднені на 15-хвилинному інтервалі. На основі цих даних була створена матриця значень для побудови тривимірного графіку, що відображає генерацію електроенергії відносно максимального значення у відсотках до часу. Запропоновано модернізацію сонячних електростанцій шляхом впровадження системи короткочасного прогнозування та установок зберігання енергії з Grid-Forming інверторами, а також модернізацію програмного забезпечення GridOS від General Electric. Проаналізовано методи компенсації небалансів та витрати операторів системи передачі в ЄС, вартість резерву підтримки частоти та генерації електроенергії, і запропоновано впровадження системи прогнозування для здешевлення процесу компенсації небалансів, з можливістю масштабування на всю енергосистему ЄС.

У *третьому* розділі розроблено нейронну мережу для аналізу інформації від сонячної електростанції. Ця мережа вивчатиме положення Сонця, рух хмар, прогнозуватиме час їхнього перетину та можливе зниження генерації електроенергії. Нейронна мережа буде вдосконалюватися під час роботи, підвищуючи точність прогнозування. Дані для навчання мережі отримуватимуться з камер з інтервалом у 4 секунди, що зменшить навантаження на обладнання. Розпізнавання хмар реалізовано за допомогою згорткової нейронної мережі на Python, а результати аналізуються в програмному забезпеченні General Electric GridOS.

У *четвертому* розділі був запропонований метод рангових коефіцієнтів узгодженості для оцінки ефективності функціонування сонячних електростанцій, а також визначені параметри для багатокритеріального алгоритму аналізу ефективності роботи зазначених станцій. На конкретному прикладі було продемонстровано алгоритм розрахунку для методу рангових коефіцієнтів узгодженості. Було проаналізовано ціни на ринку допоміжних послуг в різних країнах Європи для резерву підтримки частоти та ціни на ринку на добу наперед. Досліджено структуру генерації енергії в різних країнах Європи та принципи, що впливають на формування цін на ринках електроенергії в Європі. Також були створені порівняльні таблиці з результатами цін за 2023-2024 роки.

У *висновках* наведені ключові внески кожного розділу дисертації.

У додатках наведені неосновні результати дослідження та акт впровадження в робочий процес «Укренерго» дисертаційного дослідження.

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 3 наукових виданнях, включених на дату опублікування до переліку наукових фахових видань України.

Результати дисертації були апробовані на 4 наукових фахових конференціях.

Публікації здобувача оформлені на високому науковому рівні, основні положення та результати дисертаційної роботи отримані автором особисто, порушення принципів академічної доброчесності не виявлено.

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

Недоліки та зауваження до дисертаційної роботи.

1. Представлені в дисертаційному дослідженні результати навчання згорткової нейронної мережі (зокрема, графіки точності та втрат на навчальній та валідаційній вибірках рис. 3.5) свідчать про те, що розроблена модель на даному етапі призначена виключно для задачі бінарної класифікації зображень хмар. Аналіз графіків не надає жодної інформації щодо здатності моделі визначати положення сонця на фотографії тому потребує подальшого пояснення автора дисертаційного дослідження.
2. У роботі відсутня демонстрація візуальних результатів з окресленими областями розташування сонця та хмар на фотографії. Не представлені кількісні метрики, що оцінюють точність визначення цих координат.
3. У представленому дослідженні немає жодної інформації про те, яким чином отримана інформація про положення сонця та хмар може бути використана для подальшого аналізу в контексті систем розподілу та передачі енергії.
4. У тексті роботи міститься низка стилістичних та технічних помилок, які не впливають на науковий рівень та зміст дисертації в цілому.

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 Хомяка Андрія Олеговича на тему «Інтелектуальна система регулювання режимів роботи сонячної електростанції» 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 Хомяк Андрій Олегович заслуговує на присудження ступеня доктора філософії в галузі знань 14 Електрична інженерія за спеціальністю 141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка.

Рецензент:

доцент кафедри автоматизації електротехнічних
та мехатронних комплексів,
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені
Ігоря Сікорського»,
кандидат технічних наук,
доцент



«02» червня 2025 року

