

ВІДГУК

офіційного опонента на дисертаційну роботу
Матушкіна Дмитра Сергійовича
на тему «Короткострокове прогнозування генерації фотоелектричної станції
для задач зменшення небалансів в енергосистемі»,
представлену на здобуття ступеня доктора філософії
в галузі знань 14 Електрична інженерія
за спеціальністю 141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка

Актуальність теми дисертації.

Використання відновлюваних джерел енергії є ключовою складовою сталого розвитку та створює можливості для нових технологій, інновацій та вирішення енергетичних викликів сучасності. Це також відповідає міжнародним зобов'язанням України стосовно запобігання змінам клімату. Зовнішня військова агресія великою мірою стимулює Україну до перегляду та модернізації своєї енергетичної інфраструктури. Зазначені обставини змушують упроваджувати заходи для забезпечення стійкості та незалежності у сфері енергетики, адаптації до глобальних тенденцій в енергетиці. Прогнозування генерації електроенергії сонячними електростанціями при зростанні частки сонячної генерації важливо для управління небалансами між виробництвом та споживанням. Врахування варіабельності сонячної енергії, залежної від погодних умов та часу доби, дозволяє розробляти ефективні стратегії компенсації коливань у генерації електроенергії. Це сприяє збалансованому використанню сонячної енергії та плануванню стійкої та надійної роботи енергосистеми.

Точне прогнозування виробництва енергії сонячними установками сприяє ефективному плануванню та підтримці стабільності системи, що є важливим кроком у переході до стійкої та незалежної енергетики. Таким чином, тема дисертаційної роботи Матушкіна Д. С., спрямована на підвищення точності прогнозування генерації сонячними електростанціями для балансової надійності електроенергетичної системи, є досить *актуальною*.

Оскільки використання сучасних методів перебудови енергетики потребує знання світового передового досвіду та існуючих практик, то запропонована дисертація містить ґрунтовний огляд публікацій та здобутків за тематикою досліджень. Враховано також діючі законодавчі норми, вимоги та правила. У дисертаційній роботі досліджено способи підвищення точності прогнозування виробництва сонячної енергії на добу наперед, вплив метеорологічних умов на точність прогнозу, визначено недоліки та похибки у сучасних методах прогнозування. Особлива увага приділяється необхідності адаптації прогностичних моделей до конкретних кліматичних та географічних особливостей.

Оцінка обґрунтованості наукових результатів дисертації, їх достовірності та новизни.

Основні положення дисертації, висновки і рекомендації досить обґрунтовані. Теоретичні дослідження базуються на використанні наступних методів: статистична обробка даних, методи теорії випадкових процесів, методи

аналізу часових рядів, методи машинного навчання, математичне моделювання. Аналіз фактичних даних та результатів теоретичних досліджень виконано із застосуванням апробованих комп'ютерних програм.

Наукова новизна результатів дисертаційного дослідження полягає в наступному:

1. На основі дослідження взаємозв'язку метеорологічних параметрів створено "ієрархічну структуру" факторів, які впливають на вихідну потужність фотоелектричних станцій, і визначено найбільш значущі з них, уникаючи повторення параметрів із схожими характеристиками впливу.

2. Вперше для оцінки точності моделі прогнозування використано метод "Бенчмаркінг метрик точності прогнозу", що дозволило більш об'єктивно порівнювати пропонувані підходи з існуючими, та виявити можливості покращення прогнозу щодо генерації фотоелектричної станції на понад 50% порівняно з наявною технологією.

3. Покращено модель експоненційного згладжування для прогнозування сонячної енергії, яка ґрунтується на середньодобовому усередненні інформації попереднього дня та реальних даних. Це призводить до зменшення похибок у прогнозуванні виробництва сонячної енергії на добу наперед.

4. У галузі моделювання прогнозування сонячного випромінювання та генерації фотоелектричних систем досягнуто подальший прогрес за допомогою статистичних методів експоненційного згладжування, регресійного аналізу та штучних нейронних мереж.

Практичне значення отриманих результатів полягає у створенні додаткових можливостей виробникам відновлюваної енергії зменшити розбіжність між графіками заявленої генерації та споживання електроенергії, підтримуючи стабільний баланс потужностей в енергосистемі.

Отже, в дисертаційній роботі поставлене наукове завдання 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 **Матушкіна Дмитра Сергійовича** 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 **Матушкіна Дмитра Сергійовича** 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 в логічному стилі викладання матеріалу. Результати роботи представлено чітко та послідовно, основні положення аргументовані належним чином. Текст роботи викладено науковим стилем мовлення, технічно грамотно, і використана переважно загальноприйнята термінологія у галузі енергетики, енергоефективності та електричної інженерії. Разом з тим іноді вжито перекладені іншомовні терміни, які не мають усталених відповідників.

Дисертація складається з вступу, 4 розділів, висновків, списку літератури та 3 додатків. Загальний обсяг дисертації 176 сторінок.

У *вступі* обґрунтовано актуальність дослідження, вказано мету та завдання дослідження, наукову новизну, науковий доробок здобувача, наведено структуру дисертації.

У *першому розділі* проведено аналіз потенціалу сонячної енергії в енергетиці, включаючи виклики її інтеграції, проблеми використання традиційних джерел енергії, висвітлено сучасні тенденції в установці фотоелектричних станцій і їх проблематику, підкреслюючи важливість прогнозування генерації ФЕС для майбутніх досліджень у сфері відновлюваної енергетики.

У *другому розділі* проаналізовано метеодані, що впливають на функціонування сонячних електростанцій в Київській області, включаючи виміри, проведені на фотоелектричній станції, та виявлено кореляцію між погодними параметрами та вихідною потужністю ФЕС, підкреслено важливість розуміння цих зв'язків для ефективного прогнозування; досліджено також динаміку генерації в електростанції та вплив погодних факторів на її роботу, з висвітленням значення окремих факторів: сонячного випромінювання, температури, вологості повітря та інших параметрів для ефективності фотоелектричних панелей.

У *третьому розділі* виконано аналітичний огляд існуючих методів та моделей прогнозування для сонячної енергії, включаючи фізичні, статистичні, машинного навчання, гібридні та ансамблеві підходи, які вимагають вибору найбільш відповідної моделі залежно від конкретних умов та ресурсів, а також представлено результати розробки й вдосконалення моделей, зокрема оновлення версії моделі експоненційного згладжування та впливовість моделі LSTM-RNN у прогнозуванні фотоелектричної енергії з високою точністю та надійністю, підтверджуючи їх потенціал як ефективного інструменту у цій сфері.

У *четвертому розділі* досліджується вплив зростання частки генерації сонячної енергії на балансову надійність енергосистеми, де нестабільність у виробництві сонячної енергії може викликати проблеми у функціонуванні системи, та підкреслюється важливість використання точного прогнозування для забезпечення стабільності. Дослідження також зосереджується на оцінці моделей, які передбачають небаланс енергії, вказуючи на високу точність моделі LSTM-RNN порівняно з іншими моделями, такими як SARIMA та Random Forest.

Детальні *висновки* наведені після кожного розділу, а загальні висновки – після четвертого розділу.

У додатках наведено лістинги програмного коду розроблених моделей і акти впровадження.

Розділи дисертації логічно пов'язані між собою і є цілісним дослідженням. Дисертаційна робота чітко висвітлює методи досліджень та отримані результати, і 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 виданнях, включених на дату опублікування до переліку наукових фахових видань України; 2 статті у періодичних наукових виданнях, проіндексованих у базі даних Scopus. Також результати дисертації були апробовані на 3 наукових фахових конференціях.

Публікації здобувача оформлені на достатньому науковому рівні, фактів порушення принципів академічної доброчесності не виявлено. Основні результати дослідження, що відображають особистий внесок здобувача, повністю відображені в розділах дисертації.

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

Недоліки та зауваження до дисертаційної роботи.

1) Стосовно наукової новизни: формування ієрархічної структури кліматичних факторів не є принципово новим, автор запропонував спосіб застосування такого підходу до нової структури та складу фактичних даних щодо метеорологічних параметрів.

2) В пропонованій моделі експоненційного згладжування не наведено обґрунтування стаціонарності досліджуваного часового ряду, що є передумовою застосування статистичних методів. Досліджений діапазон змін константи згладжування α в межах від 0,1 до 0,9 варто розширити до граничних значень (0, 1), що дало б розуміння асимптотичних властивостей та відмінності пропонованої моделі експоненційного згладжування від класичних моделей.

3) При дослідженні оптимального набору параметрів авторегресійної моделі з ковзним середнім використано перебір значень, але не зазначено методів попередньої оцінки та вибору параметрів моделі за характеристиками часового ряду.

4) Оцінка відносної похибки пропонованої моделі прогнозування є вагомою частиною загальних висновків, однак сама методика оцінки в наведених прикладах (рис. 4.6, 4.9 та табл. 4.3) недостатньо деталізована.

5) Автор навів класифікацію методів прогнозування, вказавши також використання фізичних методів (метеорологічних прогнозів, або NWP-моделей) і справедливо зазначивши, що поєднання кількох моделей призводить до більш точних прогнозів, однак в подальшому досліджувались лише статистичні методи прогнозування часових рядів. Це обмежує практичну цінність пропонованих підходів.

6) Викладення матеріалу загалом чітке та стилістично виважене, однак присутня певна кількість орфографічних та синтаксичних помилок, а також

довільний переклад іншомовних термінів (розділ 3.6), що загалом не впливає на розуміння матеріалу.

Вважаю, що висловлені зауваження не є визначальними, мають переважно рекомендаційний характер, не применшують загальну наукову новизну та практичну значимість результатів і лишають позитивною загальну оцінку дисертаційної роботи.

Висновок про дисертаційну роботу

Вважаю, що дисертаційна робота здобувача ступеня доктора філософії **Матушкіна Дмитра Сергійовича** на тему «Короткострокове прогнозування генерації фотоелектричної станції для задач зменшення небалансів в енергосистемі» 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 знань 14 – Електрична інженерія.

Дисертаційна робота за актуальністю обраної теми, обсягом та рівнем виконаних досліджень, практичною цінністю та науковою новизною відповідає вимогам чинного законодавства України, що передбачені в пп. 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, а її автор, **Матушкін Дмитро Сергійович** заслуговує на присудження ступеня доктора філософії в галузі знань 14 – Електрична інженерія, за спеціальністю 141 – Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка.

Офіційний опонент:

заступник директора з наукової роботи
Інституту відновлюваної енергетики
НАН України,
доктор технічних наук,
старший науковий співробітник



Микола КУЗНЕСЦОВ



М.П.

«06» Травня 2024 року