

Голові разової спеціалізованої
вченої ради PhD 11824
Хмельницького національного
університету
доктору технічних наук, професору
Тетяні ГОВОРУЩЕНКО

29016, м. Хмельницький, вул. Інститутська, 11

ВІДГУК ОФІЦІЙНОГО ОПОНЕНТА

доктора технічних наук, доцента Рака Тараса Євгеновича на дисертаційну роботу Лисого Андрія Миколайовича на тему: «Кіберфізичні системи моніторингу дефектів фотоелектричних модулів сонячних електростанцій» подану на здобуття наукового ступеня доктора філософії з галузі знань 12 «Інформаційні технології» за спеціальністю 123 «Комп'ютерна інженерія»

Актуальність теми дисертації. Актуальність дослідження зумовлена зростанням масштабів впровадження сонячної енергетики та потребою підвищення надійності і пожежної безпеки фотоелектричних модулів сонячних електростанцій. За галузевими оцінками, частка пожеж на сонячних електростанціях, пов'язаних із локальними перегрівками та деградацією елементів модулів, становить 5-8 %, що зумовлює необхідність онлайн-виявлення пожежонебезпечних дефектів і прогнозування потенційно аварійних модулів.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дисертаційна робота виконана на кафедрі комп'ютерної інженерії та інформаційних систем Хмельницького національного університету. Її зміст відповідає тематиці роботи за держбюджетною науково-дослідною темою «Інтелектуальна система розпізнавання дефектів об'єктів зеленої енергетики із використанням БПЛА» ГУ 57-2024 (№ держреєстрації 0124U004665, фінансується коштом зовнішнього інструменту допомоги Європейського Союзу для виконання зобов'язань України у Рамковій програмі Європейського Союзу з наукових досліджень та інновацій «Горизонт 2020»), в якій автор дисертації є виконавцем.

Оцінка обґрунтованості наукових результатів дисертації, їх достовірності та новизни. Наукова новизна отриманих результатів дисертаційної роботи полягає в наступному:

1. Уперше розроблено архітектуру кіберфізичних систем моніторингу дефектів фотоелектричних модулів сонячних електростанцій на основі концепції периферійно-хмарного розподілу обробки даних. Новизною

архітектури є формування її на принципах розподілу обчислень між бортовою і наземною системами управління БПЛА, системою диспетчерського управління і хмарним сервісом, що дозволяє здійснювати раціональне опрацювання даних та збереження результатів моніторингу дефектів фотоелектричних модулів із забезпеченням низької затримки обробки даних, а також утримувати камери за заданим кутом спостереження, автоматично налаштовувати насиченість колірної палітри зображення, визначати режими роботи фотоелектричних модулів.

2. Удосконалено метод обробки даних програмно-апаратними засобами бортової системи управління БПЛА при моніторингу дефектів фотоелектричних модулів, що відрізняється уведенням моделі визначення оптимального напрямку візування камер з використанням формули Родрігеса для автоматичного позиціонування та мінімізації впливу сонячних відблисків на основі високоточного геопросторового позиціонування GPS RTK, застосовано ансамблювання різнопалітрових термограм та RGB зображень, з використанням просторової роздільної здатності зображення та формули гаверсінуса реалізовано перетворення піксельних координат виявлених дефектів у географічні координати з передачею результатів у форматі обміну даними JSON/KML. Це дозволяє досягти сантиметрової точності позиціонування дефектів, зменшити обсяг переданої з бортової до наземної системи управління інформації завдяки обробці її на борту та передачі лише релевантних зображень.

3. Удосконалено метод ансамблювання різнопалітрових термограм та RGB зображень для виявлення дефектів фотоелектричних модулів, який на першому етапі мультимодельного ансамблювання термограм відрізняється розробкою математичної моделі класифікації дефектів за їх відносною площею щодо площі одного фотоелемента. На другому етапі крос-модальної інтеграції даних уведено постобробку із заміною даних у червоному каналі RGB зображення на контури сегментованих дефектів термограм для створення композиційного термо-RGB зображення, що забезпечило релевантність передачі даних з БПЛА на наземну систему управління зі скороченням загального часу обробки даних з одного модуля на 32 %, а також підвищено середню точність виявлення пожежонебезпечних дефектів на 2-3 %.

4. Уперше розроблено метод функціонування кіберфізичних систем моніторингу дефектів фотоелектричних модулів сонячних електростанцій. Новизна методу полягає у реалізації концепції периферійно-хмарної обробки даних шляхом розподілу функцій між такими складовими: бортовою системою управління БПЛА, яка забезпечує ансамблювання та передавання релевантних зображень фотоелектричних модулів у зелено-синьому спектрі з червоною

лінією обрису дефектів, сегментованих за термографічними даними; наземною системою управління, що виконує визначення номера дефектного рядка фотоелектричного модуля та перевірку істинності режиму його роботи на основі встановленої сукупності інформативних ознак; системою диспетчерського управління та збору даних, яка забезпечує передавання логічних змінних стану датчиків модулів на наземну систему управління; хмарним сервісом, який забезпечує передавання та збереження зображень, GPS-поправок і координат модулів через систему обміну повідомленнями, побудовану на хмарній платформі Microsoft Azure.

Достовірність та обґрунтованість запропонованих методів і засобів підтверджується результатами експериментальних досліджень та коректним застосуванням методів, які були використані під час виконання роботи. Наукові положення, висновки та рекомендації, сформульовані в дисертації, логічно випливають із результатів, одержаних за допомогою чітких викладок. Тому, можна вважати, що висновки та практичні рішення, одержані у роботі достатньо обґрунтовані і коректні.

Оцінка змісту дисертації, її завершеність та дотримання принципів академічної доброчесності. За своїм змістом дисертаційна робота здобувача Лисого А. М. відповідає Стандарту вищої освіти зі спеціальності 123 та освітньо-науковій програмі ХНУ «Комп'ютерна інженерія» за спеціальністю 123 Комп'ютерна інженерія. Дисертаційна робота є завершеною науковою працею і свідчить про наявність особистого внеску здобувача у науковий напрям комп'ютерної інженерії. На основі аналізу матеріалів дисертаційної роботи, можна зробити висновок, що робота є результатом самостійних досліджень здобувача і не містить елементів плагіату та запозичень. Використані результати і тексти інших авторів мають належні посилання на відповідне джерело.

Практичне значення одержаних результатів. Результатом застосування концепції периферійно-хмарного розподілу обробки даних в архітектурі кіберфізичних систем моніторингу стало забезпечення раціонального їх функціонування, опрацювання даних і збереження результатів моніторингу із забезпеченням низької затримки у реальному часі.

Застосування моделі згорткової нейронної мережі YOLOv12m-seg за архітектурним принципом anchor-free з комплексуванням методів і алгоритмів обробки зображень дозволяє отримати значення інтегрального показника точності та повноти виявлення дефектів за метрикою F1-score більше 90 %.

На основі застосування методу ансамблювання різнопалітрових термограм та RGB зображень підвищено значення показника середньої точності детекції дефектів на 2-3 %.

Розроблена система автоматичного оповіщення про появу підвищеної і пожежонебезпечної температури на поверхні фотоелектричного модуля забезпечує виробленням відповідних логічних змінних для розрізнення режимів роботи як пожежа, пожежна небезпека, спрацювання захисту.

Теоретичні та практичні результати дисертаційного дослідження достатньо повно впроваджені у компаніях виробників програмних продуктів, а також в освітньому процесі та науковій діяльності навчальних закладів.

Мова та стиль викладення результатів. Дисертаційна робота написана українською мовою. Матеріал викладено логічно, послідовно та доступно для розуміння, на належному науково-технічному рівні з використанням сучасної термінології у галузі кіберфізичних систем, комп'ютерного зору, безпілотних літальних апаратів та сонячної енергетики. Стиль викладу відповідає вимогам до текстів науково-технічного змісту. Текст дисертації достатньо проілюстровано рисунками і таблицями, які покращують сприйняття матеріалу та пояснюють основні положення і результати дослідження.

Дисертаційна робота складається з анотації, змісту, переліку умовних скорочень, вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел та додатків. Робота містить необхідні структурні елементи та оформлена з дотриманням чинних вимог до дисертацій, встановлених наказом МОН України від 12 січня 2017 р. № 40 «Про затвердження вимог до оформлення дисертації» (зі змінами).

Оприлюднення результатів дисертаційної роботи. Основні наукові результати дисертації відображені у публікаціях здобувача та пройшли апробацію на науково-практичних заходах. Матеріали публікацій всебічно висвітлюють ключові наукові положення роботи, зокрема щодо побудови архітектури кіберфізичної системи моніторингу дефектів фотоелектричних модулів, застосування методів обробки термограм і RGB-зображень, геоприв'язки дефектів на основі GPS RTK та інтеграції результатів з даними SCADA. У працях, виконаних у співавторстві, особистий внесок здобувача є суттєвим і полягає у постановці задач дослідження, розробленні моделей і алгоритмів, реалізації програмних компонентів та проведенні експериментальної перевірки отриманих результатів. Таким чином, наукові результати описані в дисертаційній роботі повністю висвітлені у наукових публікаціях здобувача.

Зауваження до дисертаційної роботи:

1. У роботі відсутня інформація щодо обмежень кількості БПЛА, які можуть одночасно працювати в межах однієї системи SCADA та загалом розробленої архітектури кіберфізичної системи без виникнення

критичних затримок при передачі JSON-повідомлень через систему ZeroMQ.

2. При обґрунтуванні доцільності використання бортового комп'ютера Nvidia Jetson AGX Orin 32GB (п. 2.1) автор не навів порівняльного аналізу енергоспоживання цього модуля в режимі максимального навантаження згорткової нейромережі, що безпосередньо впливає на час польоту БПЛА та доцільність формування архітектури кіберфізичної системи.
3. Для донавчання моделі YOLOv12m-seg використано набір даних, де дефекти 1 та 2 класів становлять лише 10 % та 5 % відповідно (таблиця 3.1), при цьому відсутній інформація про результати аналізу впливу такого дисбалансу вибірки на ймовірність пропуску (FN) цих типів аномалій.
4. При фрагментації RGB зображень методом ковзного вікна у п. 3.1 не описано механізм обробки дефектів, які опиняються на межі розрізу, що може призводити до їх фрагментації або втрати при сегментації і подальшої класифікації.
5. Для моніторингу дефектів фотоелектричних модулів сонячних електростанцій в роботі обрано модель згорткової нейронної мережі YOLOv12m-seg (п. 3.1), однак відсутні обґрунтування вибору та результати порівняння з іншими типами архітектур (наприклад, EfficientDet) на власному специфічному наборі даних для підтвердження переваги обраного підходу.
6. При розробленні методу ансамблювання у п. 3.3 здійснено вибір триколірних палітр для ефективного виявлення малих дефектів, що базується на експериментах. Проте відсутнє теоретичне обґрунтування вибору конкретних палітр для різних типів покриття панелей і умов спостереження.
7. Для системи оповіщення заявлено використання протоколів ZigBee та WiFi (стор. 123), проте відсутні дані та результати досліджень стосовно обмежень стабільної передачі сигналу в умовах експлуатування елементів сонячних електростанцій і відповідності загальноприйнятим стандартам організації передачі даних на об'єктах енергетики.

Наведені зауваження мають окремий, а інколи й дискусійний характер, не знижують науковий рівень дисертаційного дослідження та не впливають на його загальну позитивну оцінку.

Висновок:

Дисертаційна робота Лисого Андрія Миколайовича «Кіберфізичні системи моніторингу дефектів фотоелектричних модулів сонячних електростанцій»

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. Дисертаційна робота за актуальністю, практичною цінністю та науковою новизною повністю відповідає вимогам чинного законодавства України, що передбачені «Порядком присудження ступеня доктора філософії та скасування рішення разової спеціалізованої вченої ради закладу вищої освіти, наукової установи про присудження ступеня доктора філософії» (Постанова Кабінету Міністрів України від 12 січня 2022 р. № 44 із змінами, внесеними згідно з Постановами КМ № 341 від 21.03.2022, № 502 від 19.05.2023, № 507 від 03.05.2024).

Здобувач Лисий Андрій Миколайович заслуговує на присудження наукового ступеня доктора філософії з галузі знань 12 «Інформаційні технології» за спеціальністю 123 «Комп'ютерна інженерія».

Офіційний опонент
професор кафедри інформаційних технологій,
керівник освітніх програм
ПЗВО «ІТ СТЕП Університету»
доктор технічних наук, доцент

«03» 03

2026 р.



Тарас РАК