

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

кандидата технічних наук, доцента Пітуха Ігоря Романовича
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

1. Актуальність теми дисертаційного дослідження

Сонячна енергетика належить до перспективних напрямів альтернативних джерел електричної енергії, що динамічно розвиваються у всьому світі. Ефективність та пожежна безпека експлуатування об'єктів сонячної енергетики будь-якого масштабу залежать від своєчасного виявлення та усунення дефектів фотоелектричних модулів. Діючі методи моніторингу не завжди дають змогу ефективно виявляти пожежонебезпечні дефекти фотоелектричних модулів сонячних електростанцій. Актуальним є впровадження автоматизованих систем моніторингу на базі безпілотних літальних апаратів, концепції Інтернету речей та систем диспетчерського управління.

При обробці зображень наземним сервером управління БПЛА час обробки зображень може становити десятки секунд на передачу і обробку даних з одного модуля, залежно від умов розповсюдження радіосигналу. Автоматичне виявлення невеликих дефектів потребує збільшення насиченості термограм, що призводить до зростання кількості хибних детекцій та необхідності додаткової зйомки.

Актуальність теми дисертаційної роботи підтверджується необхідністю усунення виявленого протиріччя між зростаючою потребою в оперативному та достовірному виявленні дефектів за допомогою БПЛА, систем диспетчерського управління та недостатнім розвитком програмно-апаратних засобів, які одночасно охоплювали б адаптивне управління камерами БПЛА, злиття зображень, поглиблене нейромережеве розпізнавання та оцінку дефектів щодо пожежної безпеки.

2. Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами

Дисертаційна робота виконувалася в межах науково-дослідної тематики Хмельницького національного університету за держбюджетною науково-дослідною темою «Інтелектуальна система розпізнавання дефектів об'єктів зеленої енергетики із використанням БПЛА», в якій автор дисертації є виконавцем.

3. Наукова новизна отриманих результатів

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. Це дозволяє отримати значення інтегрального показника точності та повноти виявлення дефектів не менше 90 %, розрізнити режими роботи фотоелектричних модулів як пожежа, пожежна небезпека, спрацювання захисту, що покращує автоматизацію процесу моніторингу фотоелектричних модулів сонячних електростанцій та підвищує їх пожежну безпеку експлуатування.

4. Аналіз основного змісту дисертації

У першому розділі здійснено аналіз сучасного стану моніторингу дефектів фотоелектричних модулів сонячних електростанцій, проаналізовано основні види дефектів, а також засоби і методи їх моніторингу. Здійснено постановку задачі дослідження.

У другому розділі представлено розробку архітектури кіберфізичних систем моніторингу дефектів фотоелектричних модулів сонячних електростанцій на основі концепції периферійно-хмарної обробки даних. Проведено дослідження обчислювального середовища архітектури кіберфізичних систем, обґрунтовано програмно-апаратні засоби на основі застосування згорткової нейронної мережі на борту БПЛА.

У третьому розділі представлено: удосконалений метод обробки даних програмно-апаратними засобами бортової системи управління БПЛА при моніторингу дефектів; метод ансамблювання різнопалітрових термограм та RGB зображень для виявлення дефектів з використанням моделі YOLOv12m-seg; а також метод функціонування кіберфізичних систем моніторингу.

У четвертому розділі представлено експериментальне дослідження ефективності різних версій моделей YOLO для задачі моніторингу дефектів фотоелектричних модулів, оцінено технічні характеристики та можливості кіберфізичних систем моніторингу, представлено результати експериментальних досліджень виявлення дефектів в умовах реальної експлуатації сонячних електростанцій, а також результати оцінки впливу природно-кліматичних умов на ефективність моніторингу.

5. Ступінь обґрунтованості наукових положень, висновків та рекомендацій

Обґрунтованість результатів забезпечується коректним застосуванням математичного апарату для опису управління програмно-апаратними засобами моніторингу, використанням відомих програмних інструментів та попередньо навчених моделей глибокого навчання, проведенням експериментів у реальних умовах експлуатації фотоелектричних модулів сонячних електростанцій, де було виявлено дефекти, у тому числі пожежонебезпечні, що підтвердило перевагу запропонованих підходів над базовими методами.

Достовірність результатів підтверджується експериментальними дослідженнями, апробацією на міжнародних конференціях та практичним впровадженням.

6. Практичні результати та їх значення

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 впроваджені у компанії «Drone UA» ТОВ «Роботікс Дістрібьюшн», у ТОВ «Nolt technologies», в освітньому процесі Хмельницького національного університету, у державній організації УкрНОІВІ, у науковій діяльності Національної академії Державної прикордонної служби України.

7. Оформлення дисертації, дотримання вимог академічної доброчесності та повнота викладу наукових положень та результатів в опублікованих працях.

Дисертаційна робота загальним обсягом 192 сторінки містить вступ, 4 розділи, висновки, список використаних джерел з 125 найменувань, додатки. Обсяг основного тексту дисертації становить 133 сторінки.

Робота оформлена відповідно до вимог наказу МОН України від 12 січня 2017 року №40 (із змінами, внесеними згідно з Наказом Міністерства освіти і науки № 759 від 31.05.2019). У дисертації не виявлено текстових запозичень і

використання наукових результатів інших науковців без посилань на відповідні джерела.

Основні наукові результати дисертаційної роботи відображені у 13 наукових публікаціях, зокрема: 3 статті у виданнях, проіндексованих у базі даних Scopus; 3 статті у фахових виданнях України; 6 публікацій у матеріалах конференцій, з яких 4 проіндексовані у базі даних Scopus; 1 публікація додатково відображає наукові результати дисертації.

Усі сформовані наукові положення і результати дисертації належним чином оприлюднені у наукових публікаціях здобувача, які всебічно відображають концептуальні засади проведеної роботи, ключові наукові здобутки та їхню практичну цінність. У працях опублікованих у співавторстві, особистий внесок здобувача є вагомим та полягає в генеруванні наукових ідей, розробленні математичних моделей, алгоритмічного забезпечення, а також в безпосередньому проведенні експериментальних досліджень та аналізі отриманих даних.

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

8. Мова і стиль викладу

Дисертація написана українською мовою. Стиль викладу науковий, логічний. Використана термінологія відповідає предметній області дослідження. Текст дисертації структурований, висновки до розділів чітко сформульовані.

9. Зауваження та дискусійні положення щодо змісту дисертації

Вважаю за доцільне зазначити наступні зауваження:

1. У підрозділі 2.2 запропоновано архітектуру кіберфізичних систем з розподіленою обробкою даних, проте відсутня інформація про обмеження застосування цієї архітектури в умовах обмеженої пропускної здатності каналів зв'язку, при масштабуванні системи на великі сонячні електростанції.

2. Для експериментальних досліджень використовувався БПЛА DJI Matrice 300 RTK з камерою Zenmuse H20T та бортовим комп'ютером NVIDIA Jetson AGX Orin. Реальні умови експлуатування можуть відрізнитися наявністю різноманітних типів БПЛА та обчислювальних платформ, що може вплинути на ефективність запропонованих методів при їх адаптації до іншого обладнання.

3. У підрозділі 3.3 розроблено метод ансамблювання різнопалітрових термограм та RGB зображень. В той же час не проаналізовано випадки, коли умови освітлення або погодні фактори, застосування інших типів камер можуть вплинути на ефективність методу крос-модальної інтеграції.

4. У розділі 3 (рис. 3.14) представлено результати сегментації дефектів на термограмах різних палітр. Однак відсутня градаційна шкала температур на термограмах, що ускладнює візуальну оцінку відповідності виявлених дефектів їх термічним характеристикам.

5. У підрозділі 2.1 наведено порівняльну характеристику БПЛА для моніторингу дефектів фотоелектричних модулів, де обрано DJI Matrice 300 RTK. Проте відсутні важливі параметри, такі як максимальна дальність польоту,

швидкість переміщення, ціна обладнання, що могли б вплинути на остаточний вибір. Також не зазначено, чи проводились експериментальні дослідження з іншими моделями БПЛА для підтвердження переваг обраного зразка, чи вибір базується виключно на аналізі технічних характеристик з документації виробника.

Зазначені зауваження є рекомендаційними, не впливають істотно на зміст дисертаційної роботи та не знижують її наукову новизну і практичну цінність.

ВИСНОВОК

Дисертаційна робота Лисого Андрія Миколайовича «Кіберфізичні системи моніторингу дефектів фотоелектричних модулів сонячних електростанцій» є завершеною науковою працею, в якій вирішено актуальну наукову задачу розробки методів і засобів моніторингу дефектів фотоелектричних модулів сонячних електростанцій з використанням програмно-апаратних засобів БПЛА і системи диспетчерського управління на основі формування архітектури кіберфізичних систем з розподіленою обробкою даних.

Наукові положення, висновки та рекомендації, сформульовані в дисертації, обґрунтовані та достовірні. Дисертаційна робота містить науково-практичні результати, що становлять особистий внесок здобувача в галузі кіберфізичних систем, методів комп'ютерного зору та обробки зображень, застосування глибокого навчання для моніторингу об'єктів зеленої енергетики.

Дисертаційна робота відповідає вимогам Постанови Кабінету Міністрів України від 12 січня 2022 р. № 44 «ПОРЯДОК присудження ступеня доктора філософії та скасування рішення разової спеціалізованої вченої ради закладу вищої освіти, наукової установи про присудження ступеня доктора філософії» (із змінами, внесеними згідно з Постановами КМ № 341 від 21.03.2022, № 502 від 19.05.2023, № 507 від 03.05.2024), а 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 кандидат технічних наук, доцент,
доцент кафедри спеціалізованих комп'ютерних систем
Західноукраїнського національного університету

«02» березня 2026 р.

Ігор ПТУХ

