

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

РЕЦЕНЗІЯ

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 дослідження та її зв'язок із планами наукових робіт університету.

Експлуатування фотоелектричних модулів сонячних електростанцій супроводжується виникненням різноманітних дефектів, що призводять до зниження ефективності роботи електростанцій, а у критичних випадках до виникнення пожежонебезпечних ситуацій. За статистикою, дефекти фотоелектричних модулів є причиною до 8 % випадків виникнення пожеж на об'єктах сонячної енергетики, що становить загрозу для безпеки експлуатування.

У зв'язку з цим, актуальним є застосування сучасних кіберфізичних систем на базі безпілотних літальних апаратів (БПЛА), які інтегрують можливості термографічного та оптичного моніторингу, засоби штучного інтелекту для автоматичного розпізнавання дефектів на основі згорткових нейронних мереж, системи диспетчерського управління та збору даних (SCADA), а також концепції периферійно-хмарної обробки даних. Такий підхід дозволяє забезпечити оперативне виявлення пожежонебезпечних дефектів з точністю понад 90 % за метрикою F1-score, їх геопросторову локалізацію з сантиметровою точністю за допомогою GPS RTK та своєчасне прийняття рішень щодо попередження аварійних ситуацій.

Тому, вирішення науково-прикладної задачі підвищення пожежної безпеки експлуатування об'єктів сонячної енергетики шляхом створення кіберфізичних систем моніторингу дефектів фотоелектричних модулів, є актуальним у сучасних умовах.

Дослідження, результати яких наведено в дисертації, виконувалось у рамках науково-дослідної тематики Хмельницького національного університету, Національної академії Державної прикордонної служби України.

Формулювання наукової задачі та мети й задач дослідження.

Здобувач коректно визначив об'єкт і предмет дослідження, яким є методи й засоби кіберфізичних систем моніторингу дефектів фотоелектричних модулів сонячних електростанцій з використанням програмно-апаратних засобів з розподіленою обробкою даних. Метою дослідження є забезпечення оперативного розрізнення

режимів роботи фотоелектричних модулів як пожежа, пожежна небезпека, спрацювання захисту на основі застосування архітектури кіберфізичних систем з розподіленою обробкою даних моніторингу дефектів фотоелектричних модулів сонячних електростанцій.

Для досягнення мети у роботі вирішено такі задачі:

проведено аналіз сучасного стану моніторингу дефектів фотоелектричних модулів сонячних електростанцій;

розроблено архітектуру кіберфізичних систем моніторингу дефектів фотоелектричних модулів сонячних електростанцій;

удосконалено метод обробки даних програмно-апаратними засобами бортової системи управління БПЛА;

удосконалено метод ансамблювання різнопалітрових термограм та RGB зображень для виявлення дефектів фотоелектричних модулів;

розроблено метод функціонування кіберфізичних систем моніторингу дефектів фотоелектричних модулів сонячних електростанцій з реалізацією концепції периферійно-хмарної обробки даних;

здійснено постановку експериментів і проведено з розробленими програмно-апаратними засобами експериментальні дослідження на діючій промисловій сонячній електростанції.

Наукова новизна отриманих автором результатів 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. Це покладено в основу селективної фільтрації детекцій окремо для двоколірних і триколірних термограм та подальшого селективного комбінування результатів сегментації, отриманих за допомогою моделі згорткової нейронної мережі YOLOv12m-seg, що запобігає втраті пожежонебезпечних дефектів менших за розмір 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.

Короткий аналіз основного змісту дисертації.

У вступі обґрунтовано актуальність наукової задачі, окреслено сутність наукової новизни і практичної значимості роботи. Подано зв'язок роботи з науковими дослідженнями та зазначено особистий внесок здобувача у публікаціях.

У першому розділі розглянуто проблеми моніторингу фотоелектричних модулів сонячних електростанцій. Проаналізовано методи виявлення дефектів фотоелектричних модулів, їх основні типи та їх вплив на електричну потужність модулів. Окрему увагу приділено аналізу засобів і сучасних методів моніторингу, зокрема порівняльному аналізу БПЛА DJI Matrice 300 RTK, DJI Mavic 2 Enterprise, Parrot Anafi USA та програмно-апаратних засобів NVIDIA Jetson AGX Orin 32GB,

NVIDIA Xavier, Raspberry Pi 4 Model B, що дозволило виявити їх переваги та обмеження, а також сформулювати невирішені проблеми щодо автоматизації процесу моніторингу та підвищення точності виявлення пожежонебезпечних дефектів.

У другому розділі розроблено архітектури кіберфізичних систем моніторингу дефектів фотоелектричних модулів сонячних електростанцій на основі концепції периферійно-хмарної обробки даних. Проведено дослідження обчислювального середовища архітектури кіберфізичних систем, обґрунтовано вибір програмно-апаратних засобів, зокрема БПЛА DJI Matrice 300 RTK з камерою Zenmuse H20T, обчислювального модуля NVIDIA Jetson AGX Orin 32GB, а також застосування моделі згорткової нейронної мережі YOLOv12m-seg архітектури anchor-free з підтримкою сегментації об'єктів. Розроблено структурну схему архітектури кіберфізичних систем з чотирма рівнями: периферійним (бортова система управління БПЛА), проміжним (наземна система управління), локальним (система диспетчерського управління SCADA) та хмарним (Microsoft Azure IoT Hub).

У третьому розділі удосконалено метод обробки даних програмно-апаратними засобами бортової системи управління БПЛА при моніторингу дефектів фотоелектричних модулів з використанням формули Родрігеса для розрахунку матриці повороту камери у тривимірному просторі. Удосконалено метод ансамблювання різнопалітрових термограм (Iron та Rainbow) та RGB зображень для виявлення дефектів фотоелектричних модулів з використанням моделі згорткової нейронної мережі YOLOv12m-seg, який включає два етапи: мультимодельне ансамблювання термограм з селективною фільтрацією детекцій за критерієм відносної площі дефекту та крос-модальну інтеграцію даних із заміною червоного каналу RGB зображення на контури сегментованих дефектів термограм. Розроблено метод функціонування кіберфізичних систем моніторингу дефектів фотоелектричних модулів сонячних електростанцій з реалізацією концепції периферійно-хмарної обробки даних та розподілом функцій між складовими системи.

У четвертому розділі представлено експериментальне дослідження ефективності різних версій моделей YOLO для задачі моніторингу дефектів фотоелектричних модулів сонячних електростанцій, де встановлено перевагу моделі YOLOv12m-seg з показником $mAP@0.5 = 0.92$ та $F1-score = 0.91$. Оцінено технічні характеристики та можливості кіберфізичних систем моніторингу дефектів, зокрема швидкість обробки зображень, точність геопросторової локалізації дефектів, мінімальну затримку передачі даних. Представлено результати експериментальних досліджень виявлення дефектів фотоелектричних модулів сонячних електростанцій на діючій промисловій електростанції, що підтвердило ефективність запропонованих підходів та їх практичну значущість для підвищення пожежної безпеки експлуатування сонячних електростанцій.

У висновках подано здобуті теоретичні та практичні результати досліджень, сформульовані у вигляді положень наукової новизни та практичного значення.

Додатки містять наукові статті, що відображають результати роботи у 6 фахових виданнях, а також тези конференцій, акти про впровадження у ТОВ «Роботікс

Дістрібьюшн», ТОВ «Nolt technologies», Хмельницькому національному університеті, Національній академії Державної прикордонної служби України та опис патенту на корисну модель системи моніторингу сонячної електростанції.

Обґрунтованість і достовірність наукових положень, висновків і 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, зокрема на діючій сонячній електростанції, де було виявлено дефекти, у тому числі пожежонебезпечні, що підтвердило перевагу запропонованих підходів над базовими методами.

Практичне значення отриманих результатів.

За результатами виконаних досліджень здобувачем розроблено архітектуру кіберфізичних систем моніторингу дефектів фотоелектричних модулів сонячних електростанцій на основі концепції периферійно-хмарної обробки даних, алгоритми та програмно-апаратні засоби забезпечення автоматичного виявлення, сегментації і геопросторової локалізації дефектів з сантиметровою точністю, що працюють під керуванням такої системи в умовах реальної експлуатації промислових сонячних електростанцій. Це дало змогу створювати спеціалізовані системи моніторингу з покращеними характеристиками точності виявлення пожежонебезпечних дефектів ($F1\text{-score} = 0,91$) та їх локалізації з сантиметровою точністю, що працюють на основі БПЛА DJI Matrice 300 RTK з обчислювальним модулем NVIDIA Jetson AGX Orin 32GB та інтеграції з системами диспетчерського управління SCADA з підтримкою протоколів Modbus TCP/IP та OPC UA.

Застосування концепції периферійно-хмарного розподілу обробки даних в архітектурі кіберфізичних систем моніторингу стало результатом забезпечення раціонального їх функціонування з низькою затримкою обробки даних, опрацювання даних безпосередньо на борту БПЛА за допомогою моделі YOLOv12m-seg і збереження результатів моніторингу у хмарному сервісі Microsoft Azure IoT Hub із забезпеченням затримки передачі даних менше 2 секунд, утримання камер за заданим кутом спостереження відносно площини модулів з урахуванням положення Сонця за допомогою формули Родрігеса, автоматичного налаштування насиченості колірної палітри термографічних зображень для покращення контрастності дефектів.

Застосування моделі згорткової нейронної мережі YOLOv12m-seg за архітектурним принципом anchor-free з комплексуванням методів і алгоритмів обробки зображень, зокрема методу ансамблювання різнопалітрових термограм та RGB зображень, методу селективної фільтрації детекцій за критерієм відносної площі дефекту, методу кластеризації DBSCAN для групування дефектів у рядки модулів, дозволяє отримати значення інтегрального показника точності та повноти виявлення дефектів за метрикою $F1\text{-score} = 0,91$ (точність Precision = 0,89, повнота Recall = 0,93),

що свідчить про достатньо високі показники якості автоматичного розпізнавання дефектів фотоелектричних модулів.

На основі застосування методу ансамблювання різнопалітрових термограм та RGB зображень для виявлення дефектів фотоелектричних модулів підвищено значення показника середньої точності детекції дефектів на 2-3% порівняно з використанням лише однієї колірної палітри термограм, а також скорочено загальний час обробки даних з одного модуля на 32% завдяки обробці даних безпосередньо на борту БПЛА обчислювальним модулем NVIDIA Jetson AGX Orin 32GB та передачі на наземну систему управління лише релевантних зображень модулів з виявленими дефектами, що зменшує обсяг переданої інформації на 65-70%.

Розроблено алгоритм застосування кіберфізичних систем моніторингу фотоелектричних модулів сонячних електростанцій для виявлення пожежонебезпечного режиму роботи та встановлення причини за сукупністю ознак (температура поверхні модуля, площа дефекту, показники системи SCADA) з використанням БПЛА та системи диспетчерського управління і збору даних.

Розроблено систему автоматичного оповіщення про появу підвищеної (85-120°C) і пожежонебезпечної температури (понад 120°C) на поверхні фотоелектричного модуля сонячної електростанції з виробленням відповідних логічних змінних для розрізнення режимів роботи фотоелектричних модулів як пожежа (температура понад 120°C), пожежна небезпека (температура 85-120°C), спрацювання захисту (зниження струму на 50% при нормальній температурі), що реалізовано на платформі Microsoft Azure IoT Hub з використанням протоколу MQTT для обміну повідомленнями.

Експериментальні дослідження на діючій промисловій сонячній електростанції потужністю 5 МВт, де було проведено моніторинг 2847 фотоелектричних модулів і виявлено 127 дефектів, з яких 23 класифіковані як пожежонебезпечні (hotspot з температурою понад 85°C), підтвердили коректність функціонування кіберфізичних систем моніторингу дефектів фотоелектричних модулів з методами ансамблювання та периферійно-хмарною обробкою даних.

Теоретичні та практичні результати дослідження впроваджені у компанії «Drone UA» ТОВ «Роботікс Дістрібьюшн» при розробці проєкту комплексної системи моніторингу технічного стану сонячних електростанцій з використанням БПЛА та технологій штучного інтелекту (акт впровадження від 27.11.2025), у ТОВ «Nolt technologies» при розробці веб-додатку контролю технічного стану панелей сонячних електростанцій із застосуванням технологій штучного інтелекту, машинного навчання та інтернету речей на основі платформи React.js, Node.js, MongoDB (акт впровадження від 26.11.2025), в освітньому процесі Хмельницького національного університету на кафедрі комп'ютерної інженерії та інформаційних систем при викладанні дисциплін «Комп'ютерний зір», «Штучний інтелект», «Інтернет речей» для спеціальностей 123 Комп'ютерна інженерія та 126 Інформаційні системи та технології (акт впровадження від 25.11.2025), у Національній академії Державної прикордонної служби України при розробці НДР «Методика опрацювання розрахунків з утримання прикордонної

інфраструктури на ділянках державного кордону», шифр 0124U004798 (акт впровадження від 30.12.2025).

Особистий внесок здобувача.

Здобувач особисто розробив архітектуру кіберфізичних систем моніторингу дефектів фотоелектричних модулів сонячних електростанцій на основі концепції периферійно-хмарного розподілу обробки даних з чотирма рівнями (периферійний, проміжний, локальний, хмарний), удосконалив метод обробки даних бортовою системою управління БПЛА з використанням формули Родрігеса для автоматичного позиціонування камери та формули гаверсінуса для перетворення координат, метод ансамблювання різнопалітрових термограм та RGB зображень з селективною фільтрацією детекцій за критерієм відносної площі дефекту, розробив метод функціонування кіберфізичних систем моніторингу з реалізацією концепції периферійно-хмарної обробки даних. Усі основні наукові та прикладні результати дисертаційної роботи отримані здобувачем самостійно.

За результатами проведених досліджень основні наукові результати опубліковано у 6 наукових статтях, з яких 3 статті опубліковані у періодичних виданнях, що індексуються в наукометричній базі Scopus (видання 3-го квартилю); 6 робіт в матеріалах міжнародних та всеукраїнських конференцій поміж яких 4 роботи індексовані в наукометричній базі Scopus.

Автором подано у співавторстві одну заявку на корисну модель u202504589 «Система автоматичного оповіщення про появу підвищеної і пожежонебезпечної температури на поверхні фотоелектричного модуля сонячної електростанції» (лист від 25.09.2025 № 16918/ЗУ/25).

Структура та обсяг дисертації.

Дисертаційна робота складається з анотації, змісту, переліку умовних скорочень, вступу, чотирьох розділів, висновку, списку використаних джерел та додатків. Повний обсяг роботи містить 192 сторінки друкованого тексту.

Зауваження і рекомендації.

У результаті розгляду дисертації сформовано наступні зауваження та рекомендації.

1. У главі 1.2 при аналізі типів дефектів фотоелектричних модулів наведено класифікацію дефектів за їх впливом на електричну потужність, пожежну безпеку в залежності від їх розміру. Доцільно було б доповнити цю частину кількісними даними про температурні енергетичні характеристики різних типів дефектів на основі літературних джерел або власних попередніх досліджень, що дозволило б краще обґрунтувати класифікацію дефектів модулів, що пов'язані з пожежою, пожежною небезпекою, спрацюванням захисту.

2. У підрозділах 1.3, 2.1 представлено порівняльний аналіз програмно-апаратних засобів обробки зображень (NVIDIA Jetson AGX Orin 32GB, NVIDIA Xavier, Raspberry Pi4 Model B, БПЛА DJI Matrice 300 RTK), проте відсутнє порівняння енергоспоживання цих пристроїв, що є критичним параметром для бортових систем БПЛА з обмеженою ємністю акумуляторів. Доцільно було б доповнити таблицю 2.1

даними про споживання потужності кожного пристрою у режимі обробки зображень за допомогою моделі YOLO та оцінити вплив цього параметра на зменшення часу автономної роботи БПЛА DJI Matrice 300 RTK.

3. У таблиці 4.5 представлено характеристики архітектури кіберфізичних систем моніторингу, проте відсутнє обґрунтування вибору конкретних протоколів передачі даних між рівнями управління. Зокрема, не зазначено, чому для зв'язку між бортовою та наземною системами обрано канал на частоті 2,4 ГГц/5,8 ГГц з максимальною дальністю передачі до 15 км, а не інші альтернативи (LTE, LoRa тощо), та не проаналізовано вплив погодних умов на якість зв'язку та затримку передачі даних.

4. У підрозділі 4.1 при описі вибору моделі згорткової нейронної мережі YOLO наведено порівняння різних версій (YOLOv8, YOLOv9, YOLOv10, YOLOv11, YOLOv12) лише за показниками точності (mAP) та швидкості обробки, без врахування розміру моделі та вимог до обчислювальних ресурсів. Доцільно було б доповнити таблицю 4.2 даними про обсяг пам'яті, що вони займають, та споживання оперативної пам'яті під час виконання на обчислювальному модулі NVIDIA Jetson AGX Orin 32GB (32 GB RAM).

5. У третьому розділі при описі методу обробки даних бортовою системою управління БПЛА використано формулу Родрігеса для визначення оптимального напрямку візування камер з урахуванням положення Сонця, проте відсутнє експериментальне підтвердження ефективності цього підходу. Доцільно було б навести результати порівняльних експериментів з використанням та без використання автоматичного орієнтування камери за формулою Родрігеса, щоб кількісно оцінити вплив сонячних відблисків на якість термограм (контрастність, відношення сигнал/шум) та точність виявлення дефектів за різних умов освітленості (ранок, полудень, вечір).

6. У висновках сформульовано основні наукові та практичні результати дослідження, проте деякі твердження потребують уточнення. Зокрема, зазначено, що розроблена система дозволяє «підвищити пожежну безпеку експлуатування сонячних електростанцій», проте не наведено кількісних оцінок цього підвищення (наприклад, на скільки відсотків зменшується ризик виникнення пожежі, на скільки швидше виявляються пожежонебезпечні дефекти порівняно з традиційними методами моніторингу, яка економічна ефективність від впровадження системи). Такі кількісні оцінки були б корисними для обґрунтування практичної значущості роботи та прийняття рішень про впровадження розробленої системи на реальних сонячних електростанціях.

Однак зазначені зауваження не є принциповими, істотно не впливають на зміст дисертаційної роботи та не знижують її наукової та практичної цінності.

Загальний висновок.

Отже, дисертаційна робота Лисого Андрія Миколайовича за темою «Кіберфізичні системи моніторингу дефектів фотоелектричних модулів сонячних електростанцій» є завершеною науковою кваліфікаційною працею, яка містить новий та актуальний науково-прикладний внесок. Усі результати, які виносяться на захист, є достовірними та отриманні автором особисто.

Тому, з огляду на вище вказане, вважаю, що дисертаційна робота «Кіберфізичні системи моніторингу дефектів фотоелектричних модулів сонячних електростанцій», яка подана на здобуття ступеня доктора філософії, за своїм науковим рівнем та практичною цінністю, змістом та оформленням повністю відповідає вимогам, що викладені в Постанові 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 її автор Лисий Андрій Миколайович заслуговує на присудження ступеня доктора філософії за спеціальністю 123 Комп'ютерна інженерія.

Рецензент,
канд. ф-м. наук, доцент,
доцент кафедри комп'ютерної інженерії
та інформаційних систем
Хмельницького національного університету



04.03.2024
І.С.Мартинюк

Тетяна КИСІЛЬ

Підпис Тетяни КИСІЛЬ засвідчую
Проректор з наукової роботи
Хмельницького національного університету



Олег СИНЮК

Олег СИНЮК