

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

1. Актуальність теми дослідження. Розвиток сонячних електростанцій є одним із пріоритетних напрямків енергетичної незалежності України. Проте експлуатація їх фотоелектричних модулів супроводжується виникненням дефектів, що призводять до зниження ефективності роботи електростанцій, а у критичних випадках до виникнення пожежонебезпечних ситуацій.

Актуальною науково-прикладною задачею є підвищення пожежної безпеки експлуатування об'єктів сонячної енергетики, що переважно залежать від результатів моніторингу фотоелектричних модулів, виявлення та усунення їх дефектів. Традиційні методи моніторингу не завжди дають змогу ефективно виявляти пожежонебезпечні дефекти фотоелектричних модулів. Тому у світовій практиці впроваджуються автоматизовані системи моніторингу на базі безпілотних літальних апаратів (БПЛА), концепції Інтернету речей.

Наукова робота Лисого А. М. спрямована саме на розробку методів та засобів кіберфізичних систем моніторингу дефектів фотоелектричних модулів сонячних електростанцій з використанням програмно-апаратних засобів із розподіленою обробкою даних.

2. Формулювання наукової задачі, мети і задач дослідження. Здобувач правильно визначив об'єкт і предмет дослідження. Так, об'єктом дослідження є процес моніторингу дефектів фотоелектричних модулів сонячних електростанцій з використанням програмно-апаратних засобів. Предметом дослідження є методи й засоби кіберфізичних систем моніторингу дефектів фотоелектричних модулів сонячних електростанцій з використанням програмно-апаратних засобів з розподіленою обробкою даних.

Мету дисертаційного дослідження визначено, як 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

Поставлену мету досягнуто в результаті розв'язання таких задач:

проведення аналізу сучасного стану моніторингу дефектів фотоелектричних модулів сонячних електростанцій, основних їх видів, а також проведено аналіз засобів і сучасних методів моніторингу дефектів фотоелектричних модулів сонячних електростанцій;

розроблення архітектури кіберфізичних систем моніторингу дефектів фотоелектричних модулів сонячних електростанцій на основі концепції периферійно-хмарної обробки даних;

удосконалення методу обробки даних програмно-апаратними засобами бортової системи управління БПЛА при моніторингу дефектів фотоелектричних модулів;

удосконалення методу ансамблювання різнопалітрових термограм та RGB зображень для виявлення дефектів фотоелектричних модулів з використанням моделі згорткової нейронної мережі YOLOv12m-seg;

розроблення методу функціонування кіберфізичних систем моніторингу дефектів фотоелектричних модулів сонячних електростанцій;

здійснення постановки експериментів і проведення з розробленими програмно-апаратними засобами експериментальних досліджень з метою підтвердження ефективності запропонованих рішень.

3. Наукова новизна отриманих результатів:

1) уперше розроблено архітектуру кіберфізичних систем моніторингу дефектів фотоелектричних модулів сонячних електростанцій на основі концепції периферійно-хмарного розподілу обробки даних, яка на відміну від існуючих, формується на принципах розподілу обчислень між бортовою і наземною системами управління БПЛА, системою диспетчерського управління і хмарним сервісом;

2) удосконалено метод обробки даних програмно-апаратними засобами бортової системи управління БПЛА при моніторингу дефектів фотоелектричних модулів, що відрізняється від існуючих 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, застосуванням ансамблювання різнопалітрових термограм та RGB зображень з використанням

просторової роздільної здатності зображення та формули гаверсинуса для перетворення піксельних координат виявлених дефектів у географічні координати з передачею результатів у форматі обміну даними JSON/KML;

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, що 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, а 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;

4) уперше розроблено метод функціонування кіберфізичних систем моніторингу дефектів фотоелектричних модулів сонячних електростанцій, новизна якого полягає у реалізації концепції периферійно-хмарної обробки даних шляхом розподілу функцій між бортовою системою управління БПЛА, наземною системою управління, системою диспетчерського управління та збору даних, і хмарним сервісом на платформі Microsoft Azure.

4. Аналіз змісту дисертації.

У вступі обґрунтовано актуальність задачі підвищення пожежної безпеки експлуатування об'єктів сонячної енергетики через застосування кіберфізичних систем моніторингу на основі БПЛА. Визначено перспективність застосування архітектури з периферійно-хмарним розподілом обробки даних. Представлено зв'язок теми з науковими дослідженнями, результати роботи та приклади впровадження.

У першому розділі здійснено огляд предметної області дослідження, розглянуто проблеми моніторингу фотоелектричних модулів сонячних електростанцій, зокрема особливості виникнення дефектів та їх вплив на безпеку експлуатування. Проаналізовано методи виявлення дефектів фотоелектричних модулів, їх відомі типи та вразливості процесів моніторингу. Окрему увагу приділено аналізу засобів і сучасних методів моніторингу, що дозволило виявити їх переваги та обмеження, а також сформулювати невирішені проблеми.

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 вибір програмно-апаратних засобів, зокрема БПЛА DJI Matrice 300 RTK з камерою Zenmuse H20T, обчислювального модуля NVIDIA Jetson AGX Orin, а також застосування моделі згорткової нейронної мережі YOLOv12m-seg.

У третьому розділі представлено удосконалений метод обробки даних програмно-апаратними засобами бортової системи управління БПЛА при моніторингу дефектів фотоелектричних модулів, удосконалений метод ансамблювання різнопалітрових термограм та RGB зображень для виявлення дефектів фотоелектричних модулів з використанням моделі згорткової нейронної мережі YOLOv12m-seg, а також розроблений метод функціонування кіберфізичних систем моніторингу дефектів фотоелектричних модулів сонячних електростанцій.

У четвертому розділі представлено експериментальне дослідження ефективності різних версій моделей YOLO для задачі моніторингу дефектів фотоелектричних модулів сонячних електростанцій, оцінено технічні характеристики та можливості кіберфізичних систем моніторингу дефектів. Представлено результати експериментальних досліджень виявлення дефектів фотоелектричних модулів сонячних електростанцій на діючій промисловій електростанції, що підтвердило ефективність запропонованих підходів.

У висновках подано здобуті теоретичні та практичні результати досліджень. Додатки містять наукові статті, що відображають результати роботи, акти про впровадження, а також лістинг коду розробленого програмного забезпечення.

5. Обґрунтованість і достовірність наукових положень, висновків і рекомендацій. Наукові положення, висновки і рекомендації дисертації обґрунтовані коректним та доцільним використанням математичного апарату для опису управління програмно-апаратними засобами моніторингу, зокрема формули Родрігеса для визначення напрямку візування камер, формули гаверсінуса для перетворення координат, методів ансамблювання даних, використанням відомих програмних інструментів та попередньо навчених моделей глибокого навчання, зокрема YOLOv12m-seg, проведенням експериментів у реальних умовах експлуатування фотоелектричних модулів сонячних електростанцій, зокрема на діючій сонячній електростанції, де було виявлено дефекти, у тому числі пожежонебезпечні, що підтвердило значущу перевагу запропонованих підходів над базовими методами, а також їх апробацією на міжнародних та всеукраїнських наукових конференціях.

6. Практичне значення отриманих результатів. За результатами виконаних досліджень здобувачем розроблено архітектуру кіберфізичних систем моніторингу дефектів фотоелектричних модулів сонячних електростанцій,

алгоритми та засоби забезпечення автоматичного виявлення і геопросторової локалізації дефектів, що працюють під керуванням такої системи в умовах реальної експлуатації. Це дало змогу створювати спеціалізовані системи моніторингу з покращеними характеристиками точності виявлення пожежонебезпечних дефектів та їх локалізації, що працюють на основі БПЛА та інтеграції з системами диспетчерського управління. Застосування концепції периферійно-хмарного розподілу обробки даних в архітектурі кіберфізичних систем моніторингу стало результатом 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%, що свідчить про достатньо високі показники якості автоматичного розпізнавання дефектів. 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%, а також скорочено загальний час обробки даних з одного модуля на 32%.

Експериментальні дослідження підтвердили коректність функціонування кіберфізичних систем моніторингу дефектів фотоелектричних модулів на основі методу ансамблювання та периферійно-хмарної обробки даних.

Теоретичні та практичні результати дослідження впроваджені у компанії «Dronе UA» ТОВ «Роботікс Дістрібьюшн» при розробці проєкту комплексної системи моніторингу технічного стану сонячних електростанцій, у ТОВ «Nolt technologies» при розробці веб-додатку контролю технічного стану панелей сонячних електростанцій із застосуванням технологій штучного інтелекту, машинного навчання та інтернету речей, а також в освітньому процесі Хмельницького національного університету на кафедрі комп'ютерної інженерії та інформаційних систем при викладанні дисциплін для спеціальностей 123 Комп'ютерна інженерія та 126 Інформаційні системи та технології.

7. Особистий внесок здобувача. Усі основні наукові та прикладні результати дисертаційної роботи отримані здобувачем самостійно. За результатами проведених досліджень основні наукові результати опубліковано у 6 наукових статтях у фахових наукових журналах України, апробація засвідчена публікаціями 6 праць в матеріалах міжнародних та всеукраїнських конференцій. Із зазначених публікацій 3 статті і 4 тези доповідей проіндексовані у базі даних Scopus.

8. *Структура та обсяг дисертації.* Дисертаційна робота складається з анотації, змісту, переліку умовних скорочень, вступу, чотирьох розділів, висновку, списку використаних джерел та трьох додатків. Повний обсяг роботи містить 192 сторінки друкованого тексту, основний текст – на 133 с.

9. *Зауваження.*

1. В першому розділі, в процесі аналізу розглянуто велику кількість аспектів, що стосуються методів моніторингу дефектів фотоелектричних модулів, їх типів та засобів виявлення. Доцільно було б звести їх в таблицю з короткими відомостями про вирішені та невирішені проблеми, щоб подати стислу, інтегровану картину стану предметної області.

2. При опису прикладу реалізації методу ансамблювання різнопалітрових термограм здобувач використовував двоколірні та триколірні палітри. Було б доцільніше більш детально обґрунтувати вибір саме цих палітр та порівняти з іншими варіантами колірної варіації термограм.

3. На рис. 3.14 наведено приклад композиційного термо-RGB зображення, але з приведеного опису не дуже зрозуміло, чи зберігається вихідна термографічна інформація після заміни червоного каналу, та як це впливає на подальшу обробку даних наземною системою управління.

4. В даному дослідженні здобувачем пропонується ряд методів, що передбачають інтеграцію з системою диспетчерського управління та збору даних (SCADA). В той же час у відношенні організації таких систем діє ряд стандартів, зокрема IEC 61850 для організації передачі даних в енергетичних об'єктах. В роботі відсутня інформація, щодо того, чи запропоновані методи враховують необхідність дотримання цих стандартів та чи є вони сумісними з існуючими SCADA-системами на сонячних електростанціях.

5. У підрозділі 3.3 при описі методу функціонування кіберфізичних систем моніторингу з реалізацією концепції периферійно-хмарної обробки даних використано платформу Microsoft Azure IoT Hub для хмарного сервісу, проте відсутнє порівняння з іншими хмарними платформами (AWS IoT Core, Google Cloud IoT Core тощо) за критеріями вартості, затримки передачі даних, надійності, підтримки протоколів обміну даними, що робить не зрозумілим вибір даної платформи.

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

10. *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 відповідають 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,

доктор філософії, доцент, завідувач кафедри
комп'ютерної інженерії та інформаційних систем

Хмельницького національного університету

«06» Березня 2026 р.

Ольга ПАВЛОВА

Підпис Ольги ПАВЛОВОЇ засвідчую.

Проректор з наукової роботи

Хмельницького національного університету

«05» Березня 2026 р.

Олег СИНЮК

