

Голові разової спеціалізованої
вченої ради PhD 9267
Хмельницького національного університету
доктору технічних наук, професору
Олександру БАРМАКУ

РЕЦЕНЗІЯ

на дисертаційне дослідження Свистуна Сергія Олеговича
на тему «Методи та засоби динамічного збору візуальних даних про дефекти
об'єктів вітроенергетики»,
подане на здобуття 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. Вітрова енергетика належить до найбільш перспективних напрямів «чистих» джерел енергії, що динамічно розвиваються у всьому світі. Ефективність та надійність експлуатації об'єктів вітрової енергетики, як от вітрових енергетичних установок (ВЕУ), переважно залежать від своєчасного виявлення та усунення дефектів, зокрема тріщин, корозійних пошкоджень і перегріву компонентів ВЕУ. Традиційні методи інспектування, що ґрунтуються на ручному огляді лопатей або башти ВЕУ, є трудомісткими, небезпечними та не завжди дають змогу охопити важкодоступні зони. Тому, у світовій практиці дедалі активніше впроваджуються автоматизовані системи моніторингу на базі безпілотних літальних апаратів (БПЛА).

Використання БПЛА, які оснащені мультиспектральними камерами, відкриває можливість швидко, безпечно й економічно обстежувати великі площі поверхонь ВЕУ та отримувати детальні зображення у видимому та інфрачервоному діапазонах. Проте ефективність такої системи залежить від надійних методів оброблення та аналізу даних, здатних автоматично виявляти та класифікувати дефекти, визначати ступінь їхньої критичності і, за потреби, генерувати рекомендації щодо ремонтних робіт. Зокрема використанню БПЛА та їх груп, гарантуванню за будь-яких реальних умов їх функціонування, у тому числі в умовах природніх впливів і для вирішення різноманітних завдань, а також розпізнаванню образів із використанням БПЛА, присвячені роботи багатьох іноземних та українських вчених.

Дисертацію виконано в рамках науково-дослідної тематики Хмельницького національного університету: держбюджетної науково-дослідної теми «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.

Формулювання наукової задачі, мети й задач дослідження.

Сучасний стан розвитку методів і засобів моніторингу об'єктів вітрової енергетики (ВЕУ) свідчить про дедалі активніше впровадження автоматизованих систем на базі безпілотних літальних апаратів (БПЛА). Однак, попри зростаючу потребу в оперативному та достовірному виявленні дефектів ВЕУ, спостерігається брак інтегрованих рішень, які б охоплювали повний цикл від адаптивного планування польоту БПЛА, злиття мультиспектральних зображень, поглибленого нейромережевого розпізнавання до кількісної оцінки критичності пошкоджень. Тому, актуальною науково-прикладною задачею є розроблення та впровадження кіберфізичних систем динамічного збору візуальних даних про дефекти об'єктів вітроенергетики.

Об'єктом дослідження визначено процеси збору, розпізнавання та обробки зображень, отриманих із використанням БПЛА, для виявлення дефектів об'єктів вітрової енергетики.

Предметом дослідження є методи і засоби забезпечення збору, розпізнавання та обробки зображень, отриманих із використанням БПЛА, для виявлення дефектів об'єктів вітрової енергетики.

Мету дисертаційної роботи визначено як покращення ефективності збору, точності розпізнавання та оброблення зображень, отриманих із використанням БПЛА, для виявлення дефектів об'єктів вітрової енергетики.

Мету дисертаційної роботи успішно досягнуто в результаті виконання таких **завдань дослідження**:

1. Проведено аналіз сучасного стану досліджень щодо моніторингу та інспектування ВЕУ з використанням БПЛА, виявлено існуючі засоби та відомі методи.

2. Розроблено архітектуру кіберфізичних систем динамічного збору візуальних даних про дефекти об'єктів вітроенергетики для складних умов вітропарків.

3. Розроблено метод визначення траєкторій обльоту БПЛА для інспектування компонентів ВЕУ в тривимірному просторі з урахуванням особливостей конструкцій лопатей і впливу зовнішніх чинників.

4. Розроблено метод злиття мультиспектральних зображень (видимий та інфрачервоний діапазони), які дають змогу забезпечити високу точність виявлення дефектів за різних умов освітлення.

5. Вдосконалено ансамблевий підхід до поєднання моделей глибокого навчання різного призначення для підвищення показників точності та ефективності виявлення дефектів на компонентах ВЕУ.

6. Розроблено метод оцінювання критичності виявлених дефектів, який дав змогу інтегрувати фізичні параметри пошкоджень, експертні знання та інструменти нечіткої логіки й дав можливість визначити пріоритет ремонтних дій.

7. Розробити кіберфізичну систему динамічного збору візуальних даних щодо дефектів об'єктів вітрової енергетики, здійснити постановку експерименту та провести з нею експериментальні дослідження щодо встановлення покращення ефективності виявлення дефектів об'єктів ВЕУ на отриманих зображеннях та впровадити її у виробництво.

Наукова новизна одержаних автором результатів полягає в наступному:

1) розроблено нову архітектуру кіберфізичних систем динамічного збору візуальних даних про дефекти об'єктів вітроенергетики, яка, на відміну від відомих рішень, поєднує адаптивне планування польоту БПЛА з урахуванням вітрових навантажень, синхронізований збір мультиспектральних зображень, хмарно-периферійне оброблення даних на основі ансамблю глибоких нейронних мереж та модуль нечіткого оцінювання ризику дефектів, що забезпечує повністю автономний цикл «зліт – сканування – аналіз – звіт» та, в такий спосіб, мінімізує залежність від оператора, скорочує час інспектування кожної турбіни та підвищує достовірність виявлення тріщин, ерозії й перегріву;

2) розроблено новий метод визначення траєкторій обльоту БПЛА для інспектування компонентів ВЕУ, який, на відміну від наявних, поєднує динамічне планування польоту БПЛА у тривимірному просторі з урахуванням фактичної геометрії лопатей, що дає змогу адаптувати та налаштовувати траєкторії для кожного компоненту ВЕУ з урахуванням його характерних особливостей, що в такий спосіб зменшує енерговитрати польоту та ризик пропуску дефектних ділянок, особливо на складнопрофільних поверхнях лопатей;

3) розроблено новий метод злиття мультиспектральних зображень, який на відміну від відомих, використовує спеціалізовану функцію злиття тепловізійних та видимих каналів з урахуванням вагових коефіцієнтів та коригування просторових викривлень, що забезпечує підвищення контрастності та деталізації зон мікротріщин і корозії, а також виявлення температурних аномалій безпосередньо на злитих зображеннях, що в такий спосіб зменшує кількість хибних позитивних спрацьовувань під час автоматичного аналізу лопатей, башти та моторних вузлів;

4) вперше розроблено метод оцінювання критичності виявлених дефектів, що інтегрує нечіткі множини для кількісної фіксації ступеня небезпеки пошкоджень, з огляду на експертні знання й фізичні параметри ВЕУ, експертні функції вагових коефіцієнтів для різних типів і розташувань дефектів та дефазифікацію показника ризику з поділом на критичні та некритичні дефекти, що забезпечує формалізацію оцінки критичності виявлених дефектів та дає змогу визначати пріоритет ремонтних робіт, підвищуючи безпечність та економічну ефективність експлуатації об'єктів вітрової енергетики.

Обґрунтованість і достовірність наукових положень, висновків і рекомендацій. Обґрунтованість та достовірність представлених наукових положень, висновків і рекомендацій спирається на комплексний підхід, що включає: коректне застосування математичного апарату для опису траєкторних і візуальних перетворень; використання відомих і валідованих програмних інструментів, а також попередньо навчених моделей глибокого навчання. Експериментальні результати пройшли ретельний статистичний аналіз точності виявлення дефектів, а надійність результатів підтверджена методами двовибіркових t-критеріїв, які засвідчили статистично значущу перевагу запропонованих підходів над базовими методами. Практичне впровадження

отриманих в дисертації результатів здійснено в реальних умовах експлуатації ВЕУ, зокрема на діючих вітроелектростанціях, де було проведено порівняльний аналіз результатів ручного й автоматизованого інспектування.

Практичне значення одержаних результатів. Розроблена кіберфізична система за запропонованою архітектурою довела можливість майже десятикратного прискорення огляду вітрових електроустановок: один БПЛА завершує повний цикл обстеження турбіни за 25 хвилин замість мінімум чотирьох годин. В експериментальних випробуваннях це скорочує середній простій ВЕУ в 3,9 раза.

Практичною перевагою запропонованої архітектури кіберфізичних систем над аналогами є впровадження ансамблю нейромережових моделей, який поєднує зображення видимого спектра та тепловізійні дані й досягає середньої точності 92,3 % за відхилення від експертної оцінки до 0,2 бала за п'ятибальною шкалою. Завдяки ранньому виявленню мікротріщин, ерозії та локального перегріву ремонтні витрати можуть зменшитися у 5–7 разів порівняно з реагуванням після аварійної зупинки. Комбінування спектрів удвічі знизило кількість хибних спрацювань, мінімізувавши потребу в ручному валідуюванні. Крім того, повністю автоматизований цикл «зліт – знімання – аналіз – звіт» не потребує перебування людини на висоті та стабільно працює за швидкості вітру до 15 м/с. Система реалізована модульно, з відкритими прикладними програмними інтерфейсами та детально описаними алгоритмами, що забезпечує відтворюваність результатів у різних вітропарках.

Теоретичні та практичні результати дослідження впроваджені та використовуються у: ПП “НОЛТ ТЕХНОЛОДЖИС” (акт впровадження від 16.04.2025) та навчальному процесі Хмельницького національного університету (акт впровадження від 16.04.2025) на кафедрі комп'ютерної інженерії та інформаційних систем для спеціальностей 123 Комп'ютерна інженерія та 126 Інформаційні системи та технології, а також на кафедрі комп'ютерних наук для спеціальності 122 Комп'ютерні науки.

Особиста участь автора в одержанні наукових та практичних результатів, що викладені в дисертаційній роботі на тему *«Методи та засоби динамічного збору візуальних даних про дефекти об'єктів вітроенергетики»*. Всі основні результати дослідження, які подано до захисту, одержані автором особисто.

Дисертаційна робота виконана на базі кафедри комп'ютерної інженерії та інформаційних систем Хмельницького національного університету, науковий керівник: доктор технічних наук, професор, Савенко Олег Станіславович.

Дисертаційну роботу Свистуна Сергія Олеговича перевірено на текстові запозичення з використанням системи StrikePlagiarism: для КП 1 – 4.44%, для КП 2 – 0.55%. В результаті перевірки дисертації встановлено, що виявлені текстові запозичення в роботі відносяться до загальновідомих фраз, термінів та словосполучень та знаходяться у розділі, що присвячений огляду існуючих методів та алгоритмів; знайдені збіги не описують авторських розробок і не стосуються безпосередньо результатів дослідження.

Розглянувши звіт подібності щодо перевірки на плагіат, встановлено, що дисертаційна робота Свистуна С.О. є результатом самостійних досліджень

здобувача і не містить елементів плагіату та запозичень. Використані ідеї, результати і тексти інших авторів мають посилання на відповідне джерело.

Дисертація характеризується єдністю змісту та відповідає вимогам щодо її оформлення.

Апробація матеріалів дисертації. Апробацію основних положень, ідей, висновків дисертаційної роботи проведено на науковому семінарі кафедри комп'ютерної інженерії та інформаційних систем у Хмельницькому національному університеті. Наукові результати роботи доповідалися на таких конференціях: XV всеукраїнській науково-практичній конференції «Актуальні проблеми комп'ютерних наук АПКН-2023» (м. Хмельницький, 17–18 листопада 2023 р.); 1st International Workshop on Advanced Applied Information Technologies (Khmelnyskyi, Ukraine – Zilina, Slovakia, 5 December 2024); Protection of the National Interests by Security and Defense Sector of Ukraine: Current Problems and Tasks under the Martial Law (м. Хмельницький, 21 листопада 2024 р.).

Структура та обсяг дисертації. Дисертаційна робота складається з анотації, змісту, переліку умовних скорочень, вступу, чотирьох розділів, висновку, списку використаних джерел та п'яти додатків. Повний обсяг роботи містить 224 сторінки друкованого тексту, з них анотація – на 12 стор., зміст – на 3 стор., перелік умовних скорочень – на 1 стор., основний текст – на 174 стор., список із 156 використаних джерел – на 19 стор., додатки – на 14 стор. Дисертація містить 37 рисунків та 38 таблиць.

Зауваження. У результаті вивчення рукопису мною сформовано такі зауваження:

1) У розділі 1 проведено аналіз сучасного стану виявлення дефектів. Однак, при обговоренні існуючих комерційних платформ (згаданих на с. 2, 5 анотації) та методів інспектування (с. 37-42) бракує більш глибокого порівняльного аналізу їхніх обмежень, що не повною мірою обґрунтовує переваги запропонованої системи.

2) На с. 108 описуються параметри зміщення IR-камери відносно RGB-камери (10 см праворуч, 5 см вище). Варто було уточнити, чи ці значення є фіксованими для конкретної апаратної конфігурації БПЛА, що використовувалася в дослідженнях, чи це параметри, які система може автоматично калібрувати або вимагають ручного введення для різних моделей БПЛА/камер.

3) На с. 151 описано експериментальне середовище з використанням AirSim та Unreal Engine. Проте у п. 4.2.1 відсутній опис фізичних параметрів дрона DJI Matrice 300 RTK, який використовувався для моделювання польотів в середовищі AirSim. Таке упущення може ускладнити відтворення результатів дисертації в реальних умовах.

4) У тексті дисертації трапляються окремі стилістичні та граматичні неточності (наприклад, на с. 22 у фразі «зокрема на діючих вітроелектростанціях, де було порівняно результати ручного й автоматизованого інспектування» краще було б «були порівняні»; на с. 120, «умову нормалізації та мінімізуючи різницю» краще «умову нормалізації та мінімізують різницю»).

Втім, зазначені зауваження суттєво не впливають на загальний, доволі високий, рівень проведеного дослідження.

Загальний висновок. Вважаю, що дисертаційна робота Свистуна С.О. «Методи та засоби динамічного збору візуальних даних про дефекти об'єктів вітроенергетики» містить нові науково обґрунтовані теоретичні та експериментальні результати в галузі 12 Інформаційні технології, які в сукупності забезпечують розв'язання актуальної науково-прикладної задачі розроблення методів збору, розпізнавання та обробки зображень отриманих з використанням БПЛА для ідентифікації заданих об'єктів, які б покращували ефективність збору, точність розпізнавання та обробки зображень отриманих з використанням БПЛА для ідентифікації заданих об'єктів.

Дисертаційна робота «Методи та засоби динамічного збору візуальних даних про дефекти об'єктів вітроенергетики», яка подана на здобуття ступеня доктора філософії, за своїм науковим рівнем та практичною цінністю, змістом та оформленням повністю відповідає вимогам пп. 6, 7, 8, 9 «Порядку присудження ступеня доктора філософії та скасування рішення разової спеціалізованої вченої ради закладу вищої освіти, наукової установи про присудження ступеня доктора філософії», затвердженому постановою Кабінету Міністрів України від 12 січня 2022 р. № 44 (зі змінами, внесеними згідно з Постановами Кабінету Міністрів України № 341 від 21.03.2022, № 502 від 19.05.2023, № 507 від 03.05.2024), а її автор, Свистун Сергій Олегович, заслуговує на присудження ступеня доктора філософії за спеціальністю 123 Комп'ютерна інженерія.

Рецензент:

док.філ., доцент, завідувач кафедри
комп'ютерної інженерії та інформаційних систем
Хмельницького національного університету



Ольга ПАВЛОВА

«Підпис Ольги ПАВЛОВОЇ засвідчую»:

Проректор з наукової роботи
Хмельницького національного університету



Олег СИНЮК