

Голові разової спеціалізованої
вченої ради PhD 9267
Хмельницького національного
університету
доктору технічних наук, професору
Олександру БАРМАКУ
29016, м. Хмельницький,
вул. Інститутська, 11

ВІДГУК ОФІЦІЙНОГО ОПОНЕНТА

кандидата технічних наук, доцента Дубчак Лесі Орестівни
на дисертаційну роботу **Свистуна Сергія Олеговича**

*«Методи та засоби динамічного збору візуальних даних про дефекти об'єктів
вітроенергетики»*,

подану до захисту на здобуття наукового ступеня **доктора філософії**
з галузі знань 12 Інформаційні технології
за спеціальністю 123 Комп'ютерна інженерія

1. Актуальність теми дисертаційної роботи.

Вітрова енергетика становить один із перспективних напрямів розвитку відновлюваної енергетики, що демонструє стабільне зростання на глобальному рівні. Ефективність і безперебійність функціонування вітроенергетичних установок (ВЕУ) значно зумовлені здатністю до оперативного виявлення пошкоджень, зокрема тріщин, ознак корозії або перегріву окремих компонентів. Традиційні методи технічного обстеження, що базуються на ручному інспектуванні конструкцій, є не лише високоризиковими та ресурсоемними, а й обмежено придатними для обстеження важкодоступних ділянок. Тому актуальним є використання безпілотних літальних апаратів (БПЛА) для автоматизованого моніторингу технічного стану ВЕУ.

Оснащення БПЛА мультиспектральними камерами забезпечує можливість ефективного, безпечного та економічно обґрунтованого візуального обстеження великих поверхонь як у видимому, так і в інфрачервоному спектрах. Повноцінна реалізація подібних систем вимагає впровадження надійних алгоритмів цифрової обробки даних, здатних автоматично виявляти дефекти, здійснювати їхню класифікацію, оцінювати ступінь критичності й формувати рекомендації щодо технічного обслуговування.

На сьогодні спостерігається суперечність між актуальною потребою в оперативному виявленні дефектів ВЕУ із використанням БПЛА та відсутністю комплексних технологічних рішень, які поєднали б адаптивне планування траєкторій польоту, інтеграцію мультиспектральної інформації та методи глибокого навчання для виявлення пошкоджень. Відсутність подібних рішень обмежує ефективність обстеження та підвищує ймовірність виникнення тривалих простоїв. Подолання зазначених обмежень потребує розроблення кіберфізичних систем для інтелектуального збору та обробки візуальних даних.

Таке завдання відповідає предметній області Стандарту вищої освіти України зі спеціальності 123 Комп'ютерна інженерія для третього (освітньо-наукового) рівня вищої освіти.

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

Дисертаційна робота виконувалася 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.

3. Наукова новизна отриманих результатів.

До основних наукових результатів дисертаційної роботи варто віднести:

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.

4. Короткий аналіз основного змісту дисертації.

Науковий рівень викладення дисертації відповідає вимогам МОН України. Назва дисертації "Методи та засоби динамічного збору візуальних даних про дефекти об'єктів вітроенергетики" адекватно та повною мірою відображає її зміст.

У вступі обґрунтовано актуальність теми дисертації (підвищення надійності та економічної ефективності вітрової енергетики через автоматизацію візуального огляду турбін за допомогою БПЛА), визначено мету та основні завдання (покращення ефективності збору, точності розпізнавання та оброблення зображень для виявлення дефектів), предмет та об'єкт дослідження, відображено наукову новизну (нова архітектура кіберфізичних систем, метод адаптивного планування польоту БПЛА, метод злиття мультиспектральних зображень, метод оцінювання критичності дефектів) і практичне значення одержаних результатів (прискорення огляду, зниження простоїв ВЕУ, підвищення точності виявлення дефектів).

У першому розділі здійснено аналіз предметної області дослідження, зокрема актуальності та ролі вітрової енергетики у світовому енергобалансі, типології дефектів об'єктів вітрової енергетики, існуючих методів інспектування та моніторингу (канатний, сенсорний, з БПЛА), технологій динамічного збору візуальних даних та оброблення інформації із сенсорів, а також кіберфізичних систем для виявлення та аналізу дефектів. У розділі підведено підсумки проведеного аналізу та здійснено постановку задачі дослідження.

У другому розділі подано розробку архітектури кіберфізичних систем динамічного збору візуальних даних про дефекти об'єктів вітрової енергетики. Запропоновано метод автоматизованого визначення траєкторій обльоту БПЛА для інспектування компонентів ВЕУ в тривимірному просторі, що враховує конструкцію лопатей, вплив зовнішніх чинників та різні стратегії обльоту (послідовне планування, реверсний рух, спеціалізовані траєкторії для лопатей, башти та моторного відсіку). Підведено підсумки з отриманих результатів.

У третьому розділі описано моделі та характеристики дефектів ВЕУ. Запропоновано метод злиття мультиспектральних зображень (RGB та IR) для покращення візуалізації дефектів. Описано проєктування ансамблю нейромережових моделей (YOLO, Cascade R-CNN) для виявлення дефектів на злитих зображеннях та розроблено метод оцінювання критичності виявлених дефектів на основі нечіткої логіки та експертних знань.

У четвертому розділі подано програмну реалізацію компонентів розробленої кіберфізичної системи та інтерфейсу користувача. Описано експериментальну оцінку та результати випробувань системи, включаючи дослідження ефективності автоматизованих алгоритмів керування БПЛА, комплексний аналіз точності виявлення дефектів на RGB- та злитих зображеннях з використанням ансамблю, а також дослідження методу оцінювання критичності виявлених дефектів. Проведено порівняльний аналіз розробленої системи з наявними аналогами та аналіз обмежень системи. Підведено підсумки з отриманих результатів.

У висновках подано отримані наукові та практичні результати дослідження, що підтверджують розв'язання актуальної задачі покращення ефективності збору, точності розпізнавання та оброблення зображень, отриманих із використанням БПЛА, для виявлення дефектів об'єктів вітрової енергетики через розроблення нових засобів автоматичного огляду.

5. Ступінь обґрунтованості наукових положень, висновків і рекомендацій, їх достовірність.

Сформульовані у дисертації наукові положення, висновки та рекомендації є аргументованими і підкріплені успішною реалізацією.

Обґрунтованість наукових положень та висновків дисертації ґрунтується на детальному аналізі джерел, чіткій постановці задачі дослідження і використанні сучасних методів дослідження.

Достовірність результатів дисертації підтверджується їх апробацією на міжнародних і національних наукових конференціях, а також їх впровадженням.

6. Практичні результати роботи.

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 рази.

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 валідванні. 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.

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

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.

Оформлення дисертації відповідає всім необхідним вимогам.

У дисертації не виявлено текстових запозичень і використання наукових результатів інших науковців без посилань на відповідні джерела.

За результатами досліджень опубліковано 8 наукових праць, у тому числі 4 статті в наукових фахових виданнях (з них 2 статті у фахових виданнях України категорії «Б» та 2 статті в періодичних закордонних виданнях, що входять до Scopus та/або WoS), 1 одне свідоцтво про реєстрацію авторського права на твір, 3 тез доповідей в збірниках матеріалів всеукраїнських та міжнародних конференцій (поміж яких 1 праця, що входить до Scopus).

Усі сформовані наукові положення і результати дисертації повністю викладено в опублікованих працях.

8. Мова та стиль дисертаційної роботи.

Текст дисертаційної роботи викладено в логічній послідовності. Матеріал дисертації достатньо проілюстрований схемами, рисунками, графіками й таблицями. Мова і стиль викладення змісту, оформлення дисертації відповідають вимогам, які ставляться до наукових праць.

9. Зауваження та дискусійні положення щодо змісту дисертації.

Оцінюючи загалом позитивно наукове та практичне значення отриманих дисертантом результатів, хочу висловити кілька зауважень та рекомендацій до деяких положень дисертації, які можуть бути предметом наукової дискусії та напрямами подальшої дослідницької роботи, зокрема:

1) У кроці 1.4, пункті 4 (с.77) методу визначення траєкторії обльоту БПЛА компонентів вітроенергетичних установок верхня точка визначається як вершина з мінімальною координатою y , а нижня точка – вершина з максимальною координатою y , проте рисунок 2.8 (с.78) свідчить про те, що $T_{top,i}$ – це вершина з максимальною координатою y , а $T_{bottom,i}$ – з мінімальною координатою y . Крім того, допущена помилка в назві рисунку 2.8, а саме два рази згадано $T_{top,i}$, хоча мало бути “...що з’єднує верхню точку $T_{top,i}$ з нижньою точкою $T_{bottom,i}$...”.

2) У кроці 3.3 (с. 139) методу оцінювання критичності виявлених дефектів для формування нечіткої множини експертної оцінки критичності використовується функція Гауса (формула (3.83)), де ключовим є параметр розсіювання σ . Проте у роботі недостатньо розкрито, як саме визначається цей параметр σ , щоб він адекватно відображав ступінь невизначеності або розкиду експертних оцінок для різних типів дефектів чи компонентів БЕУ.

3) Запропонований у п. 3.4 (с. 129-141) метод переважно опирається на експертні знання для визначення вагових коефіцієнтів (β , γ , η , таблиці 3.11-3.13) та функцій належності. Втім у роботі бракує аналізу чутливості запропонованого

методу до варіацій цих експертних оцінок та обґрунтування вибору саме трапецієподібної функції належності (формула 3.81).

4) У дисертації автор стверджує, що експериментальні дослідження (розділ 4) переважно проводилися у віртуальному середовищі Microsoft AirSim (п. 4.2.1, с. 151). Проте автором наведено недостатньо даних про тестування системи в реальних польових умовах на різних моделях ВЕУ та за різних погодних умов, що обмежує висновки щодо її практичного узагальнення.

5) Деякі рисунки, наприклад, рис. 1.6 (с. 51), рис. 2.3 (с. 55) та рис. 3.3 (с. 115), є досить об'ємними та інформаційно насиченими. Можливо, варто було б розглянути перенесення деяких з них або їхніх частин у додатки. Крім того, написи в деяких рисунках, наприклад, рис. 1.2 (с.34), рис. 1.3 (с.39), рис. 1.4 (с.44), рис. 1.6 (с.50), варто було б подати українською мовою для покращення читабельності.

Разом з тим підкреслюю, що зазначені зауваження істотно не впливають на зміст дисертаційної роботи та не знижують її наукову новизну та практичну цінність.

Висновки щодо дисертації загалом

На основі викладеного вище вважаю, що дисертація Свистуна Сергія Олеговича на тему «Методи та засоби динамічного збору візуальних даних про дефекти об'єктів вітроенергетики», що 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 йому наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 123 Комп'ютерна інженерія.

Офіційний опонент – к.т.н., доцент, завідувач
кафедри, комп'ютерної інженерії
Західноукраїнського національного університету

Леся ДУБЧАК

Підпис *Леся Дубчак*
Завіряю: *Анна Семіш*
НАЧАЛЬНИК
ЗАГАЛЬНОГО ВІДДІЛУ

