

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

ВІДГУК ОФІЦІЙНОГО ОПОНЕНТА

доктора технічних наук, доцента Баловсяка Сергія Васильовича
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

На даний час сфера вітроенергетики, як один із провідних сегментів екологічно чистої енергетики, демонструє динамічний розвиток у глобальному масштабі. Забезпечення високих експлуатаційних характеристик вітроенергетичних установок (ВЕУ) безпосередньо пов'язане з оперативним виявленням технічних дефектів, зокрема, тріщин, слідів корозії чи ознак перегріву. Традиційні підходи до інспектування ВЕУ, що ґрунтуються на візуальному обстеженні технічним персоналом, мають низьку ефективність через трудомісткість, високий рівень ризику та обмежений доступ до складних ділянок конструкцій.

Відповідно актуальним є використання автоматизованих систем на основі безпілотних літальних апаратів (БПЛА), що обладнані мультиспектральними сенсорами. Такі системи забезпечують отримання зображень у різних спектральних діапазонах, що дозволяє підвищити точність виявлення пошкоджень. Водночас ефективність таких рішень значно залежить від застосування алгоритмів машинного навчання до оброблення даних, здатних здійснювати автоматичне розпізнавання дефектів та оцінювати їхню критичність.

Однак на сьогодні спостерігається дефіцит інтегрованих технологічних рішень, які охоплювали б адаптивне планування траєкторій БПЛА, оброблення мультиспектральної інформації, глибокі методи машинного навчання та кількісну діагностику пошкоджень. Подолання цієї проблеми можливе через розроблення нової архітектури кіберфізичних систем візуального моніторингу ВЕУ.

Ця проблема безпосередньо пов'язана з предметною областю 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 результатів дисертаційної роботи

У дисертації вперше одержані такі нові наукові результати:

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

У вступі роботи представлено обґрунтування актуальності наукової задачі із забезпечення покращення ефективності збору, точності розпізнавання та обробки візуальних даних, отриманих із використанням БПЛА, для виявлення дефектів об'єктів вітроенергетики. Також, подано зв'язок тематики дослідження з науковими програмами, мету, завдання дослідження, наукову новизну та практичне значення отриманих результатів.

У першому розділі виконано аналіз сучасного стану виявлення дефектів об'єктів вітрової енергетики, зокрема актуальності та ролі вітрової енергетики у світовому енергобалансі, типології дефектів об'єктів вітрової енергетики, методів інспектування та моніторингу, технологій динамічного збору візуальних даних та оброблення інформації із сенсорів, а також кіберфізичних систем для виявлення та аналізу дефектів. Сформульовано постановку задачі дослідження.

У другому розділі представлено розроблену архітектуру кіберфізичних систем динамічного збору візуальних даних про дефекти об'єктів вітрової енергетики. Детально описано метод автоматизованого визначення траєкторії обльоту компонентів ВЕУ в тривимірному просторі, включаючи моделі стратегій обльоту та планування автоматизованого інспектування різних компонентів (лопатей, башти, моторного відсіку).

У третьому розділі наведено опис розроблених методів опрацювання та аналізу візуальних даних щодо дефектів об'єктів вітрової енергетики. Описано моделі та характеристики дефектів ВЕУ, метод злиття мультиспектральних зображень ВЕУ, проєктування ансамблю нейромережевих моделей для виявлення дефектів на злитих зображеннях за мультиспектральними зображеннями ВЕУ, та метод оцінювання критичності виявлених дефектів.

У четвертому розділі представлено програмну реалізацію компонентів кіберфізичної системи для визначення стану критичності виявлених дефектів ВЕУ. Наведено опис апаратного та програмного забезпечення системи, інтерфейсу користувача. Детально описано експериментальну оцінку та результати випробувань кіберфізичної системи в лабораторних умовах експлуатації, включаючи опис експериментального середовища, дослідження ефективності автоматизованих алгоритмів керування БПЛА, комплексний аналіз точності виявлення дефектів на RGB- та злитих зображеннях, експериментальне дослідження методу оцінювання критичності виявлених дефектів, порівняльний аналіз розробленої системи з наявними аналогами та аналіз обмежень і граничних умов функціонування системи.

У висновках представлено отримані наукові та практичні результати дисертаційного дослідження, що підтверджують розв'язання актуальної задачі та досягнення поставленої мети.

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

Наукові положення, висновки і рекомендації дисертації обґрунтовані коректним та доцільним використанням математичного апарату, алгоритмами побудови маршрутів, узгодження роботи різних БПЛА, збору і отримання зображень в реальних умовах, успішною реалізацією розробленої автоматизованої

системи, ефективним практичним впровадженням результатів дисертаційного дослідження на підприємствах, що використовують такі автоматизовані системи, яке продемонструвало відповідність теоретичних досліджень з реальними результатами застосування.

Обґрунтованість наукових положень та висновків, сформульованих у дисертаційній роботі, є достатньою і ґрунтується на детальному аналізі джерел за даною проблемою, чіткій постановці мети і задач дослідження, використанні сучасних методів дослідження, а також проявляється у якісному та аргументованому формулюванні висновків.

Достовірність та обґрунтованість запропонованих методів і засобів підтверджується результатами експериментальних досліджень та коректним застосуванням методів, які були використані під час виконання роботи.

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 валідуванні. 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.

Дисертаційна робота має логічну структуру. Основні висновки й рекомендації логічно витікають із результатів, які наведено в розділах роботи.

Отримані результати свідчать про високу індивідуальність роботи. По всьому тексту дисертації простежується авторський стиль. 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).

Основі положення дисертації повністю викладено в опублікованих працях. Вимоги щодо кількості та якості публікацій виконано.

8. Мова та стиль дисертаційної роботи

Вважаю, що текст дисертаційної роботи викладений чітко та в логічній послідовності. Матеріал дисертації достатньо проілюстрований схемами, рисунками, графіками й таблицями. Загальні висновки та рекомендації у дисертації випливають з проведених здобувачем досліджень та відображають основні результати роботи. Мова і стиль викладення змісту, оформлення дисертації відповідають вимогам, які ставляться до наукових праць.

Тема, зміст та отримані наукові результати роботи відповідають спеціальності 123 Комп'ютерна інженерія галузі знань 12 Інформаційні технології.

9. Зауваження та дискусійні положення щодо змісту дисертації

До зауважень та недоліків дисертації варто віднести наступне:

1) У дисертації багато уваги приділено технічним аспектам реалізації кіберфізичної системи за запропонованою архітектурою. Проте, питання безпеки автономних польотів БПЛА (наприклад, протоколи уникнення зіткнень з непередбаченими об'єктами, дії у разі втрати зв'язку) та безпеки/конфіденційності зібраних даних, особливо при використанні хмарних платформ (згаданих на с. 59-60), висвітлені недостатньо.

2) В описі експериментального середовища (п. 4.2.1, с. 151-153) згадується інспектування з двома БПЛА. Недостатньо розкрито, як саме реалізовано планування та координацію польотів двох БПЛА для уникнення зіткнень та забезпечення ефективного покриття зони інспектування, особливо при огляді однієї ВЕУ.

3) На с. 59 та в інших місцях наголошується на повній автономності кіберфізичної системи за запропонованою архітектурою. Проте у розділі 2 не розкриті механізми прийняття рішень самою системою в непередбачених ситуаціях (наприклад, втрата сигналу GPS, різка зміна погодних умов, виявлення критичної помилки БПЛА), окрім гарантованого повернення до початкової точки.

4) Архітектура кіберфізичних систем передбачає використання БПЛА з певними характеристиками (наприклад, можливість встановлення RGB та IR камер, достатній час польоту тощо). Було б корисно узагальнити мінімальні вимоги до апаратної платформи БПЛА для ефективного функціонування створеної системи.

5) Деякі деталі окремих рисунків, наприклад, рис. 1.4 (с. 45), рис. 1.6 (с. 51), складні для читання через надто малий шрифт. Можливо варто було використати інші формати шрифтів у рисунках, щоб покращити сприйняття та розуміння інформації, яка подана на них.

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

Висновки щодо дисертації загалом

Представлена дисертаційна робота *«Методи та засоби динамічного збору візуальних даних про дефекти об'єктів вітроенергетики»* є завершеною науково-дослідною роботою, яка містить нові науково обґрунтовані результати.

У дисертації розв'язано актуальну науково-прикладну задачу покращення ефективності збору, точності розпізнавання та оброблення зображень, отриманих із використанням БПЛА, для виявлення дефектів об'єктів вітрової енергетики.

Одержані наукові та практичні результати є значущими для галузі 12 Інформаційні технології загалом та спеціальності 123 Комп'ютерна інженерія зокрема. Тема і зміст дисертації повністю відповідають спеціальності 123 Комп'ютерна інженерія.

Отже, з огляду на актуальність теми дисертації, обґрунтованість наукових положень, висновків та рекомендацій, сформульованих у дисертації, їх новизну та практичну цінність, повноту викладу в наукових публікаціях, відсутність порушень академічної доброчесності, вважаю, що дисертація цілком 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», затверджене 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 – д.т.н., доцент, доцент
кафедри комп'ютерних систем та мереж
Чернівецького національного університету
імені Юрія Федьковича



Сергій БАЛОВСЯК

Підпис *Баловська С.*
Учений секретар Чернівецького національного
університету імені Юрія Федьковича
Свистун Сергій Олегович
"17" червня 2024

