

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 розглядається як один із ключових напрямів екологічно орієнтованого розвитку енергетичного сектору. Надійність і ефективність функціонування вітрових енергетичних установок (ВЕУ) визначається, зокрема, здатністю вчасно виявляти технічні несправності, від мікротріщин до термічних аномалій. Ручні підходи до інспектування компонентів ВЕУ залишаються недостатньо ефективними через обмежений доступ до окремих зон, небезпеку для персоналу й обмежену об'єктивність оцінювання дефектів.

Використання БПЛА, що обладнані мультиспектральними камерами, відкриває нові можливості для проведення безпечного та високоточного моніторингу технічного стану ВЕУ. Водночас ефективність таких систем суттєво залежить від якості алгоритмів обробки інформації, здатних забезпечувати виявлення дефектів, їхню класифікацію та оцінку критичності.

Отже, актуальною залишається науково-прикладна задача відсутності інтегрованих систем, що поєднують адаптивне планування маршрутів польоту, мультиспектральний аналіз, штучні нейронні мережі та аналітичні механізми прийняття рішень. Зокрема залишається потреба в комплексній автоматизації процесу інспектування компонентів ВЕУ. Одним із перспективних напрямів вирішення цієї задачі є впровадження нової архітектури кіберфізичних систем динамічного збору візуальних даних про дефекти на компонентах ВЕУ.

Наведена науково-прикладна задача відповідає предметній області Стандарту вищої освіти України зі спеціальності 123 Комп'ютерна інженерія для третього (освітньо-наукового) рівня вищої освіти, а саме: кіберфізичні системи, методи та способи подання, отримання, зберігання, передавання, опрацювання в них інформації, математичні моделі обчислювальних процесів та технології виконання обчислень, архітектура та організація їх функціонування, інтерфейси та протоколи взаємодії їх компонентів, методи та технології людино-машинної взаємодії, а також інформаційні процеси, технології, методи, способи, інструментальні засоби та системи для

дослідження, проектування, налагодження, виробництва й експлуатації кіберфізичних систем.

Дисертаційну роботу виконано в рамках науково-дослідної тематики Хмельницького національного університету: держбюджетної науково-дослідної теми «Інтелектуальна система розпізнавання дефектів об'єктів зеленої енергетики із використанням БПЛА» (№ 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.

Здобувачем визначено об'єкт і предмет дослідження, відповідно до окреслення проблеми та висунення гіпотези дослідження. Так, об'єктом дослідження визначено процеси збору, розпізнавання та обробки зображень, отриманих із використанням БПЛА, для виявлення дефектів об'єктів вітрової енергетики. Предметом дослідження встановлено методи і засоби забезпечення збору, розпізнавання та обробки зображень, отриманих із використанням БПЛА, для виявлення дефектів об'єктів вітрової енергетики. Мету дисертаційної роботи сформульовано, як покращення ефективності збору, точності розпізнавання та оброблення зображень, отриманих із використанням БПЛА, для виявлення дефектів об'єктів вітрової енергетики.

Поставлену мету пропонується досягти шляхом розв'язання таких задач:

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 (видимого та інфрачервоного діапазонів), що забезпечує 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, що інтегрує фізичні параметри пошкоджень, експертні знання та інструменти нечіткої логіки й дає змогу визначити пріоритет ремонтних дій;

7) розроблено кіберфізичну систему динамічного збору візуальних даних, проведено її експериментальні дослідження для встановлення покращення ефективності виявлення дефектів об'єктів ВЕУ та підтверджено можливість її впровадження 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 результатів забезпечується коректним застосуванням математичного апарату для опису траєкторних і візуальних перетворень, використанням відомих програмних інструментів та попередньо навчених моделей глибокого навчання, проведенням експериментів у реальних умовах експлуатації ВЕУ, зокрема на діючих вітроелектростанціях, де було порівняно результати ручного й автоматизованого інспектування, статистичним аналізом точності виявлення дефектів та перевіркою надійності результатів методами

двовибіркових t -критеріїв, які підтвердили значущу перевагу запропонованих підходів над базовими методами.

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 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.

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.

В результаті вивчення рукопису мною сформовано такі зауваження:

1. У розділі 2.2 (с. 71) при описі методу визначення траєкторій обльоту БПЛА передбачається, що геометрія компонентів БЕУ відома. У роботі варто було уточнити, у який спосіб отримується ця геометрична інформація (наприклад, з CAD-моделей).

2. На с. 76 згадується використання Detectron2 v0.6 для сегментації. Було б корисно вказати, які саме попередньо навчені моделі з Detectron2 використовувалися, або чи проводилося додаткове навчання.

3. На с. 71 згадується, що архітектура M_s забезпечує гнучкість масштабування, а на с. 152 описано експеримент з двома БПЛА. Проте у дисертації загалом недостатньо обговорено, як система буде масштабуватися для одночасного керування значно більшою кількістю БПЛА (наприклад, для інспектування великих вітропарків), зокрема, щодо розподілу обчислювальних ресурсів та управління трафіком даних.

Втім, зазначені зауваження не впливають на позитивну оцінку проведеного дослідження.

Загальний висновок.

Отже, дисертаційна робота Свистуна С.О. «Методи та засоби динамічного збору візуальних даних про дефекти об'єктів вітроенергетики» є завершеною науковою роботою, яка містить новий та актуальний науково-прикладний внесок. Усі результати, які виносяться на захист, є достовірними та отримані автором особисто.

Тому, з огляду на вище вказане, вважаю, що 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:

д.т.н., професор, професор кафедри
комп'ютерних наук

Хмельницького національного університету

Едуард МАНЗЮК



«Підпис Едуарда МАНЗЮКА засвідчую»:

Проректор з наукової роботи

Хмельницького національного університету

Олег СИНЮК

