

## РЕЦЕНЗІЯ

доктора технічних наук, професора,  
професора кафедри інформаційно-вимірювальних технологій Національного  
університету "Львівська політехніка"

**Яцука Василя Олександровича**

на дисертацію **ЦЗЕН СІНЬЮЙ (ZENG XINYU)**

на тему «Апаратно-програмне та метрологічне забезпечення дронів»,  
подану на здобуття наукового ступеня доктора філософії за  
спеціальністю 152 - Метрологія та інформаційно-вимірювальна техніка в галузі  
знань 15 - Автоматизація та приладобудування

### **1. Актуальність теми дисертації**

Широке використання, розробка та впровадження сучасних програмно-апаратних комплексів, що застосовуються у безпілотних літальних апаратах, з особливим наголосом на оптимізації характеристик їхнього метрологічного забезпечення підкреслює актуальність проведеного дослідження. Велика увага в дисертації приділена питанням забезпечення точності та надійності вимірювань під час експлуатації дронів. Тому детально розглянуті передові методи калібрування та випробувальні платформи для забезпечення здатності дронів до автономного функціонування з достатнім ступенем точності в різних умовах експлуатації, особливо наголошує на актуальності теми дисертації.

### **2. Ступінь обґрунтованості наукових положень, висновків і рекомендацій**

Наукові положення, висновки та запропоновані у дисертації ідеї є науково, теоретично та експериментально обґрунтованими.

Структура дисертаційної роботи - вступ, чотири розділи, висновки, список літератури, що налічує 71 позицію. Загальний обсяг роботи 163 сторінки включаючи 4 додатки. Подано актуальність теми, мету та завдання досліджень, їх апробацію, публікації автора.

У першому розділі дисертант аналізує завдання проектування та розробки безпілотних систем для виконання амфібійних операцій, наприклад, як водяні жучки (страйдери), досліджується можливість інтеграції апаратного забезпечення, зокрема типів Nvidia Jetson для управління в реальному часі і ROS для забезпечення модульності системи та інтеграції існуючого програмного забезпечення. Особлива увага звернута на метрологічні проблеми проекрованої системи, яка працює в двох різних фізичних середовищах. Аналізуються технічні параметри, які впливають на точність вимірювань, та екологічні фактори, пов'язані з їх функціонуванням, з метою забезпечення плавного переходу між надводним і підводним середовищами.

У другому розділі приділяється увага формуванню вимог до методів створення тестової платформи для дослідження гідродинамічних характеристик у реальних водних умовах. Для оптимізації продуктивності силової установки дронів розглядаються її



основні параметри, зокрема тяга, енергоспоживання та швидкість реакції. Аналізуються також метрологічні вимоги та шляхи забезпечення вимірювань потрібної точності із врахування важливих факторів, таких як калібрування датчика, вплив довкілля та повторюваність вимірювань.

Другий розділ присвячений розробці тестової платформи для вимірювання гідродинамічних характеристик дрона. Ключові параметри, такі як аналізуються. У цьому розділі розглядаються метрологічні умови, необхідні для забезпечення точних вимірювань, враховуючи такі фактори, як калібрування датчика, вплив навколишнього середовища та повторюваність вимірювань. В результаті для оцінювання продуктивності безпілотного пристрою в контрольованих умовах закладаються основи для подальшого вдосконалення взаємозв'язків між енергоспоживанням та ефективністю двигуна.

У третьому розділі розглядаються проблеми оптимізації положення дрона та його стабільності у підводному середовищі на основі використання додаткових фільтрів і фільтрів Калмана та вдосконалених алгоритмів фільтрації. Це дозволяє покращити контроль позиціонування дронів і підтримувати його стабільність особливо в динамічних середовищах, наприклад, відновлювати орієнтування після перешкод. Обґрунтовано важливість обробки даних у реальному часі для підвищення точності керування особливо у критичних ситуаціях. Використовувані тут методи фільтрації метрологічне забезпечують дотримання траєкторії завдяки мінімізації помибок і підвищенню надійності даних сенсорів.

Четвертий розділ присвячений гідродинамічному моделюванню поведінки дронів у реальному масштабі часу на основі експериментальних даних від встановлених на ньому сенсорів сили. Така модель дозволяє безпілотному апарату пристосовуватись до зміни підводних умов, прогнозуючи гідродинамічні сили та відповідно змінюючи свою поведінку. Для підвищення ефективності показано доцільність застосування методів машинного навчання, зокрема лінійної регресії, що допомагає оптимізувати рухи дрона у змінних робочих умовах. У цьому розділі показано значні покращення продуктивності дрона, зокрема з точки зору точності функціонування та енергоефективності.

### **3. Наукова новизна результатів досліджень**

Полягає в теоретичному обґрунтуванні та розробці комплексного методу забезпечення експлуатації підводних рухомих пристроїв на основі опрацювання результатів вимірювань їх основних параметрів траєкторії, калібрувань розроблених методів управління та експериментальної перевірки їх переміщення із застосуванням оптимальних методів управління з машинним навчанням:

1. Розроблено апаратно-програмне та метрологічне забезпечення підводних рухомих пристроїв та платформ для їх запуску, а також досліджено методи та засоби прийому, передачі, зберігання та обробки інформації від їх сенсорів на основі встановлених метрологічних та експлуатаційних характеристик у поєднанні з методами їх регулювання, що дозволило підвищити точність та зменшити невизначеність отриманих результатів.

2. Для метрологічного забезпечення підводних рухомих пристроїв та його платформ, підвищення оперативності та повторюваності та кутових характеристик



запуску, стабільності виходу на напрямок дії показано необхідність їх запуску з плавучої платформи, у схемі якої закладені граничні та оптимальні кути, які підлягають постійному аналізу та контролю для визначення моменту старту.

3. Для метрологічного забезпечення підводних рухомих пристроїв, підвищення ефективності, повторюваності та кутових характеристик пуску, стабільності виходу на необхідний напрямок руху показано необхідність запуску цих пристроїв з плавучої платформи, схема якої містить граничні та оптимальні кути, які підлягають постійному аналізу та контролю для визначення моменту пуску.

4. Висока гідравлічна щільність середовища та значна невизначеність, спричинена нею під час взаємодії з підводним рухомих пристроєм, призвели до розробки методів моделювання із застосуванням машинних методів для дослідження регресійної функції процесу регулювання на основі моделі Гауса в поєднанні з цифровою фільтрацією зашумлених даних сенсорів, що дозволило точніше прогнозувати їх поведінку в складних динамічних середовищах і приймати правильні експлуатаційні рішення з урахуванням невизначеності. функції контролю. Оптимізація алгоритмів фільтрації для усіх сенсорів дозволила знизити рівень шуму та підвищити якість зібраних даних, що зробило дрон більш стабільним, точним та довговічним.

5. Комп'ютерне моделювання гідродинаміки підводних рухомих пристроїв стало основою для покращення розуміння поведінки (стабільності та ефективності) руху підводного робота в різних водних умовах завдяки інтеграції датчиків сили з інтелектуальною системою резервуарів для води.

#### **4. Значущість результатів дослідження для науки і практики**

Застосування результатів дослідження охоплює різні дисципліни, включаючи океанічну інженерію, робототехніку, механіку, матеріалознавство, енергетику, системи керування, інформатику та сенсорні технології. Ключовим досягненням стало успішне ходове випробування 2000-метрового біонічного підводного апарату Signu I у 2023 році на Хайнані, Китай.

Дослідження також призвело до розширеної платформи для паралельного збору підводних даних. Цю платформу було оптимізовано для покращених протоколів зв'язку та вирішення проблем синхронізації в багатосистемних середовищах. Він здатний записувати в середньому 5760 наборів гідродинамічних даних на день та інтегрується з автоматизованим експериментальним обладнанням для збору та аналізу параметрів у режимі реального часу.

Крім того, дослідження зіграло ключову роль у розробці чотириноного робота з подвійним середовищем, який використовує інерційні вимірювальні блоки та об'єднання даних для забезпечення плавного переходу між наземним і підводним середовищем. Завдяки збільшенню частоти алгоритмів визначення та інтеграції даних із платформи гідродинамічного тестування було створено точне гідродинамічне моделювання для оптимізації руху робота під водою.

Крім того, розроблений під час дослідження роботизований буй був профінансований у рамках ініціативи R&D у провінції Чжецзян у 2023 році. Він став важливим інструментом у визначенні ключових факторів, що впливають на стан водних екосистем, і в заходах щодо їх відновлення.



Отримані результати використані у навчальному процесі кафедрою «Інформаційно-вимірювальні технології» Національного університету «Львівська політехніка» для підготовки фахівців за спеціальністю 152 «Метрологія та інформаційно-вимірювальна техніка» та за спеціальністю 175 «Інформаційно-вимірювальні технології», зокрема магістрів при викладанні дисципліни «Робототехніка, системи та комплекси», та аспірантів при викладанні дисципліни «Аналітичні та чисельні методи дослідження».

#### **5. Повнота відображення наукових положень, висновків і рекомендацій в опублікованих автором дисертації працях**

За результатами дисертаційного дослідження опубліковано 6 наукових праць, з них 4 статті у фахових виданнях України, 2 статті - у наукових періодичних виданнях, що включені до міжнародної наукометричної бази даних Scopus, 4 тези доповідей на наукових конференціях.

#### **6. Мова та стиль дисертаційної роботи**

Дисертація написана зрозуміло, доступно, на належному технічному рівні з використанням сучасної термінології.

Тема, зміст та отримані наукові результати роботи відповідають спеціальності 152 «Метрологія та інформаційно-вимірювальна техніка», галузі знань 15 «Автоматизація та приладобудування».

#### **7. Дискусійні положення та зауваження до дисертації**

Не зважаючи на суттєві теоретичні та практичні результати можна відмітити такі зауваження до дисертації.

1. Доцільно було б детальніше проаналізувати зарубіжні тенденції щодо можливого вдосконалення характеристик підводних рухомих пристроїв.

2. Не достатньо обґрунтовано доцільність застосування використаної платформи Nvidia Jetson порівняно з іншими аналогами.

3. Під розроблення/вибору операційної системи робота слід було б чіткіше класифікувати та описати основні виконувані підводним рухомих пристроєм функції.

4. Не показано можливості імплементації отриманих результатів в концепцію дистанційного керування розроблюваними роботами амфібіями.

5. Доцільно було б детальніше обґрунтувати необхідність використання характеристик саме двигуна та динамічної реакції гвинта під час створення випробувальної платформи для дослідження гідродинамічних характеристик.

6. Третій розділ переобтяжений відомою інформацією про принципи та особливості роботи класичних сенсорів таких як акселерометри, гіроскопи, магнітометри.

7. Не зовсім зрозуміло як обчислювались похибки під експериментальних досліджень траєкторій руху підводних рухомих пристроїв.

8. Є деякі термінологічні помилки і неточності.

Подані вище зауваження не стосуються обґрунтованості основних наукових положень та висновків дисертації та її наукової та практичної цінності.

#### **8. Загальний висновок**

Дисертація ЦЗЕН СІНЬЮЙ (ZENG XINYU) на тему «Апаратно-програмне та метрологічне забезпечення дронів» є завершеним, самостійно виконаним науковим



дослідженням.

Отримані наукові положення та практичні результати є значущими для галузі автоматика та приладобудування в цілому та метрології і інформаційно-виміральної техніки зокрема. Тема, зміст дисертації та отримані наукові результати відповідають предметній області спеціальності 152 - Метрологія та інформаційно-вимірвальна техніка. Враховуючи актуальність теми дисертації, обґрунтованість наукових висновків, положень та рекомендацій викладених у роботі, новизну та практичну цінність, повноту викладення матеріалів у наукових публікаціях, відсутність порушень академічної доброчесності, вважаю, що дисертація відповідає вимогам «Порядку присудження ступеня доктора філософії та скасування рішення разової спеціалізованої вченої ради закладу вищої освіти, наукової установи про присудження ступеня доктора філософії», затверджених постановою Кабінету Міністрів України від 12 січня 2022 року № 44, а її автор, **ЦЗЕН СІНЬОУЙ (ZENG XINYU)**, заслуговує на присудження йому наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 152 - Метрологія та інформаційно-вимірвальна техніка.

Рецензент

Доктор технічних наук, професор,  
професор кафедри інформаційно-  
вимірвальних технологій  
Національного університету  
"Львівська політехніка"



Василь ЯЦУК

Підпис д.т.н., професора Василя ЯЦУКА  
«ЗАСВІДЧУЮ»

Вчений секретар Національного університету «Львівська політехніка» к.т.н., доц.



Роман БРИЛИНСЬКИЙ