



## ВІДГУК ОФІЦІЙНОГО ОПОНЕНТА

доктора технічних наук, професора,  
старшого наукового співробітника кафедри машинобудування  
Кокрельської школи інженерії Техаського університету в Остіні, США  
**Васілевського Олександра Миколайовича**  
на дисертацію *Цзен Сіньюй*  
на тему «*Апаратно-програмне та метрологічне забезпечення дронів*»,  
представлену на здобуття наукового ступеня доктора філософії  
за спеціальністю 152 – Метрологія та інформаційно-вимірвальна техніка,  
галузь знань 15 – Автоматизація та приладобудування

### 1. Актуальність обраної теми

Розвиток безпілотних літальних апаратів, особливо підводних дронів, є одним із найбільш динамічних напрямів сучасної науки та технологій. Впровадження інноваційних матеріалів, аддитивного виробництва, штучного інтелекту та високочутливих наносенсорів відкриває нові можливості для їхнього використання у морському середовищі.

Сучасні підводні дрони відрізняються від попередніх поколінь завдяки застосуванню гнучких матеріалів із великими деформаціями, що забезпечує покращену маневреність та енергоефективність. Використання 3D-друку дозволяє створювати складні геометричні конструкції без необхідності традиційних технологій зварювання та кування, що значно знижує масу апаратів. Водночас перехід від стандартних датчиків до наносенсорів забезпечує підвищену точність збору даних, а штучний інтелект дає можливість ефективно управляти рухом і адаптуватися до змінних умов середовища.

Важливим аспектом функціонування підводних дронів є метрологічне забезпечення, яке безпосередньо впливає на точність вимірювань, керованість і стабільність роботи пристроїв. Обмеження за масою та габаритами висувають жорсткі вимоги до вибору вимірвальної апаратури та алгоритмів обробки даних. У таких умовах критичною стає метрологічна надійність, що включає повторюваність і відтворюваність характеристик дрона навіть при зміні зовнішніх умов та експлуатаційних факторів.

Таким чином, дослідження, присвячене апаратно-програмному та метрологічному забезпеченню дронів, безумовно є актуальним і важливим для розвитку сучасних технологій підводної робототехніки. Розробка методів забезпечення високоточної навігації, вимірювань і управління підводними дронами сприятиме підвищенню їхньої ефективності та надійності в реальних умовах експлуатації.

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

Дисертація Цзен Сіньюй виконана на кафедрі інформаційно-вимірювальних технологій Національного університету «Львівська політехніка». Дисертаційна робота відповідає закріпленому науковому напрямку кафедри інформаційно-вимірювальних технологій - теоретичні та прикладні основи метрології та вимірювань в інформаційних технологіях (інформаційно-вимірювальних, кіберфізичних, робототехнічних та інших системах); тестування якості продукції та програмного забезпечення.

## **3. Оцінка обґрунтованості наукових положень, висновків і рекомендацій**

Під час вирішення поставлених у дисертації задач, створення наукових положень, висновків та рекомендацій здобувачем застосовані дані, які одержані з актуальних літературних джерел, з результатів аналізу сучасного стану та перспектив розвитку методологічного забезпечення. Тому створені наукові положення, висновки та рекомендації можна вважати достатньо обґрунтованими. Крім того, обґрунтованість наукових положень, висновків та рекомендацій підтверджується результатами моделювань, практичними даними та результатами, які наведені у додатках до роботи.

## **4. Достовірність наукових положень, висновків і рекомендацій**

Достовірність наукових положень, висновків і рекомендацій, отриманих у дисертації, підтверджена результатами теоретичних та експериментальних досліджень, коректним застосуванням математичного апарату, а також впровадженням сучасних програмно-апаратних комплексів, що використовуються у безпілотних літальних апаратах, з особливим акцентом на метрологічному забезпеченні оптимізації їхніх характеристик.

## **5. Наукова новизна наукових положень, висновків і рекомендацій, сформульованих у дисертації**

У дисертації визначено мету дослідження: розробка та впровадження комплексної системи метрологічного забезпечення для високоточної роботи дронів, що інтегрує програмні та апаратні компоненти. Ця система підвищує точність вимірювань, пов'язаних з параметрами руху, такими як висота, швидкість, глибина та позиціонування, забезпечуючи надійну роботу безпілотників в різномірних середовищах. Всі поставлені здобувачем завдання спрямовані на досягнення мети дисертації, в результаті чого мета була досягнута. Завдання співвідносяться з ознаками наукової новизни дослідження, про що свідчить правильність методології та методики дослідження. Об'єкт, предмет та мета роботи логічно пов'язані. Зміст дисертації відповідає її темі та спеціальності 152 «Метрологія та інформаційно-вимірювальна техніка». Виклад матеріалів дослідження є логічним, послідовним та відповідає вимогам наукового стилю.

Аналіз поданої до захисту дисертаційної роботи дозволяє зазначити, що наукові положення, висновки та рекомендації є достатньо обґрунтованими, достовірними і змістовними. Сформовані та викладені у дисертації дослідження ґрунтуються на базових і новітніх положеннях, наукових концепціях технологіях прийняття управлінських рішень, аналізі та осмисленні наукового викладу проблематики в працях учених, а також власного наукового аналізу.

Достовірність отриманих у дисертаційній роботі наукових результатів, висновків і рекомендацій базується на належному застосуванні загальнонаукових та специфічних методів дослідження, зокрема, методів вимірювання для дронів, з акцентом на калібрування датчиків та точності систем керування, а також інструментів моделювання для імітації траєкторії та підводної динаміки дронів і аналізу впливу похибок вимірювання. Обґрунтованість також підтверджується належними розрахунками та застосуванням спеціальних програмно-технічних засобів.

Наукова новизна одержаних результатів полягає в розробці прогностичної моделі з використанням методів машинного навчання для аналізу впливу гідродинамічних сил та глибини занурення, удосконаленні методу тестування динамічних характеристик роботів-амфібій та оптимізації методів фільтрації сигналів від інерційних вимірювальних пристроїв шляхом інтеграції передових апаратних та програмних рішень.

*Науковими результатами, які належать до отриманих вперше, варто вважати:*

– розробку прогнозної моделі з використанням методів машинного навчання для аналізу впливу гідродинамічних сил та глибини занурення, що дає змогу покращити маневреність та стабільність руху роботів-амфібій.

*Науковими результатами, які належать до удосконалених та таких, що набули подальшого розвитку, є:*

- удосконалення методу тестування динамічних характеристик роботів-амфібій з використанням комплексного підходу до управління дрейфом траєкторії, що дав змогу роботам ефективно адаптуватися до змінних і складних підводних умов;

- оптимізація методів фільтрації сигналів від інерційних вимірювальних пристроїв шляхом інтеграції передових апаратних та програмних рішень.

Зазначене дає підстави стверджувати, що представлені результати дисертаційної роботи містять наукову новизну та вирішують поставлене наукове завдання.

## **6. Оцінка змісту дисертації, її завершеність та дотримання принципів академічної доброчесності**

Дисертаційна робота є цілісною, завершеною та самостійно виконаною науковою працею, яка містить особистий внесок здобувача, має теоретичну цінність і практичну значущість для розвитку сучасної науки за спрямуванням метрологія та інформаційно-вимірювальна техніка. Дисертаційна робота містить дослідження з питань метрологічного забезпечення для високоточної роботі дронів, що інтегрує програмні та апаратні компоненти. За змістом і напрямками проведених досліджень дисертація відповідає Стандарту вищої освіти зі спеціальності в галузі знань 15 «Автоматизація та приладобудування» за спеціальністю 152 «Метрологія та інформаційно-вимірювальна техніка»

Ознайомившись зі звітом подібності за результатами перевірки дисертації на текстові співпадіння, можна зробити висновок, що дисертаційна робота є результатом самостійних досліджень здобувача і не містить елементів фальсифікації, компіляції, фабрикації, плагіату та запозичень, що відповідає принципам академічної доброчесності.

## **7. Мова та стиль викладення результатів**

Текст дисертаційної роботи викладено англійською мовою. Стиль викладення матеріалів дослідження відповідає вимогам, що висуваються до

наукових праць такого рівня, вирізняється науковістю, системністю, обґрунтованістю, логічністю та послідовністю.

Дисертації притаманний логічний зв'язок викладення матеріалу, її системно структуровано, зміст чітко відображає логіку проведеного дослідження. У роботі витримано науковий стиль мовлення, вжито загальну та спеціальну термінологію, текст є стилістично коректним.

Дисертація складається з анотації, вступу, 4 розділів, які містять результати, що становлять достатньо вагомий науковий інтерес, висновків, списку літератури та додатків. Основний зміст дисертації викладено на 163 сторінках друкованого тексту, з яких 136 сторінок припадає на основний текст роботи. Додатки представлені на 27 сторінках, список використаних джерел містить 72 найменування.

У *вступі* (С. 11–18) розкрито актуальність теми дослідження, визначено мету, завдання, предмет та об'єкт дослідження, методичне підґрунтя та наукову новизну отриманих результатів, охарактеризовано практичне та теоретичне значення, а також вказано особистий внесок здобувача та наявність апробації результатів дослідження.

У *першому розділі* (С. 19–40) У першому розділі дисертації проведено аналіз апаратних систем, архітектур керування та інтерфейсів для інтеграції з датчиками різних типів. Наведено модульну архітектуру та масштабованість, що дозволяє виконувати об'єднання даних з датчиків у реальному часі. Здійснено аналіз архітектури та рівнів проміжного програмного забезпечення для зв'язку між надводними та підводними системами, що дозволяє здійснювати проектування роботів-амфібій для надводних і підводних операцій.

У *другому розділі* (С. 41–63) автором розкрито питання розробки тестової платформи для вимірювання гідродинамічних характеристик дрона в реальних водних умовах. Аналізуються ключові параметри, такі як тяга, споживання енергії та швидкість реакції, з метою оптимізації роботи силової установки. Розглянуті питання метрологічного забезпечення, необхідного для забезпечення точності вимірювань, з урахуванням таких факторів, як калібрування датчиків, вплив навколишнього середовища та повторюваність вимірювань. Оцінюючи продуктивність дрона в контрольованих умовах, цей розділ розкриває взаємозв'язок між споживанням енергії та ефективністю рушійної установки, що створює основу для подальшого вдосконалення.

Розглянуто багатообіцяючий підхід щодо вимірювань підводної динаміки, забезпечуючи більш точні та надійні вимірювання в різних програмах для просування підводних досліджень і технологій. Динамічна адаптація в режимі ковзання, заснована на так званому еквівалентному управлінні, отриманому прямими вимірюваннями вихідних сигналів фільтра

низьких частот першого порядку, що містить на вході сигнали керування з спеціально адаптованими значеннями величин.

Дані, зібрані під час тестування, відіграють вирішальну роль у розробці алгоритмів прогнозного керування, та навчанні гідродинамічних моделей на основі георадара.

У *третьому розділі* (С. 64–86) розглянуто питання пов'язані з управлінням, що виникають у підводному середовищі, з акцентом на оптимізацію стійкості і положення дрона за допомогою вдосконалених алгоритмів фільтрації. Також розглянуто питання інтеграція фільтрів, що допомагає поліпшити контроль положення дрона, дозволяючи йому підтримувати стабільність і швидко відновлюватися після збурень. Пропоновані методи фільтрації забезпечують мінімізацію похибки і підвищують достовірність отриманих з датчиків даних.

Автором виконано порівняння двох способів керування. У одному способі запропоновано використати модель прогнозного управління, а в іншому класичний PID регулятор. В результаті досліджень було встановлено, що пропонована модель прогнозного управління має кращу продуктивність при регулюванні глибини. Вона дозволяє більш плавного і точного відстежувати траєкторії з мінімальним перевищенням в порівнянні з PID регулюванням, що призводить до збільшених коливань.

У *четвертому розділі* (С. 87–121) представлено гідродинамічну модель розроблену з використанням даних у реальному часі з датчиків сили, встановлених на дроні. Ця модель дозволяє дрону адаптуватися до різних підводних умов, прогнозуючи гідродинамічні сили і відповідно коригуючи свою поведінку. Застосування методів машинного навчання, таких як лінійна регресія, допомагає оптимізувати рухи дрона і підвищує його операційну ефективність. Гідродинамічне моделювання на основі георадара дозволило оцінити похибку відстеження підводної траєкторії та ефективність руху. Інтеграція передових датчиків, таких як IMU і датчики сили, сприяла точним вимірюванням і дозволила провести глибокий аналіз реакції робота на гідродинамічні сили в різних умовах.

Установлено, що запропонована модель прогнозного управління у поєднанні з гідродинамічними моделями дали змогу в режимі реального часу коригувати вихідні дані керування, ефективно компенсуючи підводні збурення, такі як течії та турбулентність.

У *додатках* (С. 137–163) представлено коди програмного забезпечення для керування роботом та відеофайли з результатами тестування.

## **8. Оприлюднення результатів дисертаційної роботи**

Основні положення наукової новизни викладено в опублікованих працях здобувача, а саме у 10 наукових працях, з яких: 4 статті у фахових виданнях України, 2 статті у виданнях іноземних держав, яка включена до міжнародної наукометричної бази Scopus та 4 публікації у збірниках матеріалів міжнародних науково-практичних конференцій.

У загальному представлені основні наукові результати висвітлені у наукових працях здобувача і достатньою мірою відображають отримані результати дисертаційної роботи.

## **9. Дискусійні положення та зауваження щодо змісту дисертаційної роботи**

1. В першому розділі дисертації здійснено аналіз апаратних систем, архітектур керування та інтерфейсів на основі яких проектуються роботи амфібії. Однак, в цьому розділі було б доцільно навести основні технічні та метрологічні характеристики датчиків на основі яких виконується опрацювання даних та прийняття рішень. Наприклад, таких як діапазони вимірювань фізичних величин, точність (невизначеність) використовуваних датчиків, чутливість, споживана потужність та рівні живлення.

2. В другому розділі здобувачем наведено математичні моделі, що описують кінематику підводних рухових систем. В кінці цього розділу зазначено, що для підтвердження теоретичних моделей кінематики руху виконуються експериментальні випробування в контрольованих умовах. Тому, на мою думку, в дисертації доцільно було б зазначити основні параметри контрольованих умов та виконати порівняння результатів експериментальних досліджень з результатами моделювання. При цьому проаналізувати розбіжність (похибку) між результатами моделювання та експериментів і зробити відповідні висновки наскільки ці результати співпадають.

3. При описі порівняльного аналізу при використанні додаткового фільтру в підрозділі 3.1.2 (рис. 3.4) доцільно було б навести конкретні числові значення рівнів шумів та швидкості, розрахувати похибку між порівнюваними алгоритмами фільтрації та вказати числові значення цих похибок. Використання абстрактних термінів «нижчі» чи «вищі» значення параметрів у дисертації з технічних наук є некоректним.

4. З підрозділу 3.2.2 дисертації незрозуміло якою конкретною функцією (математичною моделлю) описується динаміка системи, що

запропонована в алгоритмі моделі прогнозованого керування (3.14). Який вигляд має функція, що описує зв'язок між вектором стану  $x_k$  та входом керування  $u_k$ ?

5. У підрозділі 4.2.2 здобувачем виконано аналіз ефективності моделі прогнозного управління та представлено рисунок 4.7, що ілюструє ефективність моделі прогнозування за різних умов. Однак опис отриманих результатів після представленого рисунку 4.7 відсутній. Доцільно було б детально описати отримані результати та представити конкретні числові значення відхилень між зразковими (еталонними) результатами та результатами моделювання. У зв'язку з цим виникає запитання, які числові значення похибок між результатами моделювання і еталонними величинами, представленими на рисунку 4.7?

6. З результатів представлених в таблиці 4.3 незрозуміло в яких фізичних одиницях представлені похибки та як вони були розраховані.

7. На мою думку, в дисертації недостатньо приділено уваги питанням оцінювання похибок (невизначеностей) вимірювань параметрів фізичних величин, що отримуються від датчиків та метрологічного забезпечення засобів вимірювань, що використовуються для прийняття рішень на основі отриманих від сенсорів даних. Хоча в тексті дисертації постійно згадується про підвищення точності та надійності але підтверджуючих розрахунків не наводиться.

Вважаю, що висловлені зауваження не є визначальними і не зменшують загальну наукову новизну та практичну значимість результатів, а також не впливають на позитивну оцінку дисертаційної роботи.

## **10. Загальний висновок**

Дисертаційна робота Цзен Сіньюй на здобуття ступеня доктора філософії на тему «Апаратно-програмне та метрологічне забезпечення дронів» виконана на достатньому науковому рівні, містить наукові результати дослідження, які вирішують актуальне наукове завдання, не порушує принципів академічної доброчесності та є самостійним, цілісним, закінченим науковим дослідженням. Дисертація за актуальністю, теоретичною значущістю, практичною цінністю, науковою новизною відповідає: предметній області спеціальності 152 «Метрологія та інформаційно-вимірювальна техніка» галузі знань 15 «Автоматизація та приладобудування».

Забезпечено повноту викладу у наукових публікаціях, зарахованих за темою дисертації, наукових положень, висновків і рекомендацій. За результатами проходження індивідуальної освітньо-наукової траєкторії здобувач набув необхідні теоретичні знання та відповідні компетентності.



Таким чином, враховуючи актуальність теми дисертації, обґрунтованість наукових положень, висновків та рекомендацій, сформульованих у дисертації, їх наукову новизну та практичну цінність, відповідність предметній області спеціальності, повноту викладу у наукових публікаціях, відсутність порушень академічної доброчесності, вважаю, що дисертація повністю відповідає вимогам «Порядку присудження ступеня доктора філософії та скасування рішень разової спеціалізованої ради закладу вищої освіти, наукової установи про присудження ступеня доктора філософії», затвердженого постановою Кабінету Міністрів України від 12 січня 2022 року № 44, а її автор Цзен Сіньюй, заслуговує на присудження йому наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 152 – Метрологія та інформаційно-вимірвальна техніка.

Офіційний опонент:

доктор технічних наук, професор,  
старший науковий співробітник  
кафедри машинобудування  
Кокрельської школи інженерії  
Техаського університету в  
Остіні, США

Олександр ВАСІЛЕВСЬКИЙ

Official opponent:

Doctor of Engineering Science, Professor,  
Senior Research of the department of Mechanical  
Engineering at the Cockrell School of Engineering,  
The University of Texas at Austin, USA



Oleksandr VASILEVSKYI