

## **ВІДГУК**

офіційного опонента

провідного наукового співробітника Державного науково-дослідного інституту випробувань і сертифікації озброєння та військової техніки  
доктора технічних наук, професора Дмитрієва Олега Миколайовича  
на дисертаційну роботу Білозерського Владислава Олександровича  
на тему “Методи та засоби попередньої обробки відеоданих в комплексі  
завдань наведення БПЛА”,  
яку подану на здобуття ступеня доктора філософії  
у галузі знань 15 Автоматизація та приладобудування  
за спеціальністю 151 Автоматизація та комп’ютерно-інтегровані технології

### **Актуальність теми дисертації.**

Сучасний етап розвитку безпілотних авіаційних систем характеризується переходом від дистанційного керування до високого ступеня автономності, що вимагає впровадження інтелектуальних засобів обробки візуальної інформації. Актуальність теми дисертаційного дослідження Білозерського В. О. зумовлена об’єктивною потребою у створенні завадостійких методів автоматичного наведення БПЛА, здатних стабільно функціонувати в умовах інтенсивної дії зовнішніх дестабілізуючих факторів та за відсутності сигналів глобальних навігаційних супутникових систем.

Ефективність функціонування сучасних систем технічного зору критично залежить від якості інформативних ознак зображення, які в реальних умовах піддаються деградації через атмосферну турбулентність, динамічну нестабільність фону та апаратні шуми сенсорів. Запропонований автором підхід, спрямований на вдосконалення методів просторово-морфологічної попередньої обробки відеоданих, є надзвичайно своєчасним. Він дозволяє максимізувати інформативність візуального каналу та забезпечити надійну селекцію цілей у складних завадових ситуаціях.

Особливої уваги заслуговує спрямованість роботи на реалізацію алгоритмів у межах жорстких обмежень вбудованих обчислювальних платформ. Питання балансу між обчислювальною складністю методів та їхньою здатністю працювати в масштабі реального часу є ключовим для сертифікації систем автоматичного наведення. Таким чином, розроблення каскадних моделей виявлення та адаптивних методів супроводження з інерційним прогнозуванням траєкторії безпосередньо відповідає пріоритетним завданням розвитку авіаційної техніки та систем моніторингу об’єктів, що підтверджує високий рівень актуальності обраного здобувачем напряму досліджень.

## **Загальний огляд і аналіз наукових положень і висновків дисертаційної роботи.**

Структура дисертаційної роботи обумовлена метою та завданнями роботи. Дисертація складається зі вступу, чотирьох розділів, висновків та списку використаних джерел. В анотації належним чином відображено сутність дисертаційної роботи. У вступі сформульовано актуальність, мету, завдання, об'єкт і предмет, окреслено методологічне підґрунтя, наукову новизну, практичне застосування отриманих результатів.

У вступі автор розкриває сутність наукової проблеми, що полягає у необхідності підвищення точності та надійності автоматичного наведення БПЛА за умов інтенсивної дії оптичних завад. Сформульовано об'єкт, предмет та мету дослідження, а також подано тези наукової новизни, що стосуються вдосконалення методів обробки інформативних ознак зображень у контурі управління безпілотними апаратами.

У першому розділі проведено комплексний аналіз сучасного стану та умов функціонування систем технічного зору. Автор детально досліджує вплив динамічних збурень середовища та нестабільності платформи на інформативність відеопотоку. Виконано критичний огляд існуючих алгоритмів (градієнтних, нейромережових та стохастичних), за результатами якого обґрунтовано постановку задач дослідження, спрямованих на подолання протиріччя між швидкодією та завадостійкістю обчислювальних засобів.

У другому розділі представлено математичну формалізацію та методи вдосконалення виявлення малорозмірних повітряних цілей. Основна увага приділена розробленню інтегрованої моделі просторово-морфологічної попередньої обробки, яка дозволяє стабілізувати контури об'єктів за рахунок адаптивної фільтрації та морфологічної реконструкції. Експериментально підтверджено, що впровадження цих етапів дозволяє суттєво знизити кількість хибних спрацювань та підвищити повноту локалізації цілей у складних фотометричних умовах.

У третьому розділі розроблено модель автоматичного наведення та методи адаптивного супроводження БПЛА. Автор пропонує архітектуру ієрархічної селекції на основі скінченного автомата, що забезпечує інтелектуальне управління станами системи. Впроваджено механізм інерційного прогнозування траєкторії на базі фільтра Калмана, що гарантує безперервність супроводження під час оклюзій, а семантична верифікація нейромережею у зонах інтересу забезпечує високу достовірність розпізнавання об'єктів.

У четвертому розділі викладено результати обґрунтування та розроблення апаратно-програмної платформи системи. Виконано вибір

цільового обчислювача (Raspberry Pi 4B) та оптичного сенсора (Sony IMX477) з урахуванням вимог до мінімізації латентності передачі даних. Описано модульну архітектуру програмного комплексу та результати напівнатурного моделювання, які підтвердили стабільну швидкодію системи на рівні понад 25–30 кадрів за секунду та її готовність до роботи в реальних експлуатаційних умовах.

Дисертаційну роботу завершують загальні висновки, які є аргументованими, логічними й впливають із матеріалів розділів. Вони свідчать, що Білозерському В.О. вдалося розв'язати завдання, поставлене у роботі, що сприятиме подальшому розвитку наукових досліджень визначеної проблематики.

Дисертаційна робота оформлена відповідно до вимог наказу МОН України від 12 січня 2017 р. № 40 «Про затвердження вимог до оформлення дисертації».

### **Ступінь обґрунтованості наукових положень, висновків і рекомендацій, сформульованих у дисертації.**

Дисертаційна робота Білозерського В.О. являє собою закінчене наукове дослідження.

Обґрунтованість одержаних наукових результатів, висновків і рекомендацій підтверджується

- коректним визначенням мети та завдань дослідження, які ґрунтуються на поглибленому аналізі наукових джерел за темою роботи;
- позитивними результатами застосування запропонованих моделей і методів системного аналізу, теорії ймовірності, теорії нечіткої логіки та нечітких множин, методів математичного та імітаційного моделювання;
- збігом теоретичних розрахунків та результатів експериментів щодо оцінки ефективності вдосконалених методів;
- несуперечливістю відомим положенням та результатам досліджень.

### **Достовірність і новизна отриманих результатів, наукових положень, висновків та рекомендацій.**

Результати дисертаційної роботи викладені послідовно, систематично, взаємопов'язано.

Обґрунтованість та достовірність отриманих наукових результатів, висновків і рекомендацій підтверджується коректним використанням методів цифрової обробки сигналів та зображень, стохастичної фільтрації та кінематики, комп'ютерного зору для задач виявлення та супроводження, штучного інтелекту, а також апробацією результатів на наукових конференціях та їх публікацією в визнаних наукових виданнях. Наукова

новизна одержаних результатів полягає в тому, що при вирішенні наукового завдання у дисертації:

- Удосконалено метод технічного зору для виявлення повітряних об'єктів, який на відміну від існуючих підходів базується на глибокій інтеграції засобів просторово-морфологічної обробки безпосередньо в контури формування ознак. Це дозволяє максимізувати контраст малорозмірних цілей та стабілізувати їхні інформативні ознаки в умовах інтенсивних оптичних завад, що є критично важливим для надійної первинної локалізації.

- Отримав подальшого розвитку метод адаптивного супроводження БПЛА, що комплексує візуальні трекери зі стохастичною фільтрацією Калмана та механізмом інерційного прогнозування. Запропоноване рішення забезпечує збереження неперервності треку та стійкість системи до короткочасних візуальних оклюзій, що гарантує безперервність видачі координат у контурі управління наведенням.

- Удосконалено модель автоматичного наведення на основі скінченного автомата, яка реалізує багаторівневу каскадну селекцію цілей. Новизна полягає у впровадженні алгоритмів темпоральної стабільності та семантичної верифікації об'єктів за допомогою легковагових нейромереж у зонах інтересу, що дозволяє суттєво мінімізувати кількість хибних спрацювань за умови суворого дотримання жорстких обмежень щодо обчислювальних ресурсів бортових систем.

Обґрунтованість наукових результатів дисертації забезпечується послідовним застосуванням фундаментального математичного апарату, що охоплює теорію цифрової обробки зображень, методи стохастичного оцінювання та базові положення теорії автоматичного керування, що дозволило автору створити фізично адекватні моделі завадового середовища, які враховують реальні умови функціонування авіаційних систем. Достовірність отриманих висновків безпосередньо підтверджується використанням суворої методології досліджень, яка базується на аналізі репрезентативного набору валідаційних відеопослідовностей у широкому спектрі метеорологічних та кінематичних умов, а також застосуванням об'єктивних кількісних метрик, що відповідають сучасним міжнародним стандартам випробувань систем технічного зору. Кінцеве підтвердження теоретичних положень досягається шляхом напівнатурного моделювання на цільовій вбудованій платформі, де зафіксовані показники швидкодії понад 25–30 кадрів за секунду та висока стабільність утримання цілі об'єктивно доводять готовність запропонованих рішень до практичної сертифікації та подальшого впровадження у склад перспективних безпілотних авіаційних комплексів.

Отже, в дисертаційній роботі поставлене наукове завдання виконано повністю, здобувач повною мірою оволодів методологією наукової діяльності.

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

За своїм змістом дисертаційна робота здобувача Білозерського В. О. повністю відповідає вимогам Стандарту вищої освіти зі спеціальності 151 Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології підготовки для третього (освітньо-наукового) рівня вищої освіти та напрямкам досліджень відповідно до освітньої програми Автоматизація, приладобудування та комп'ютерно-інтегровані технології.

Розглянувши звіт подібності за результатами перевірки дисертаційної роботи на текстові збіги, можна зробити висновок, що дисертаційна робота Білозерського Владислава Олександровича є результатом самостійних досліджень здобувача і не містить елементів фальсифікації, компіляції, фабрикації, плагіату та запозичень. Використані ідеї, результати і тексти інших авторів мають належні посилання на відповідне джерело.

Дисертаційна робота є завершеною науковою працею і свідчить про наявність особистого внеску здобувача у науковий напрям автоматизації інтелектуальних систем технічного зору та розроблення завадостійких методів візуального наведення автономних безпілотних апаратів на основі адаптивної обробки інформативних ознак зображень.

### **Мова та стиль викладення результатів**

Дисертаційна робота написана українською. Текст дисертації характеризується високою науковою культурою, строгістю формулювань та логічною завершеністю. Автор демонструє здатність до системного викладу результатів складних теоретичних та експериментальних досліджень у формі, доступній для фахового сприйняття.

Послідовність викладу матеріалу повністю відповідає логіці розв'язання поставленої науково-прикладної задачі: від аналізу дестабілізуючих факторів середовища до розроблення конкретних алгоритмічних рішень та їхньої апаратної перевірки. Стиль мовлення – стриманий, академічний, що відповідає вимогам до кваліфікаційних наукових праць.

Здобувач вільно та коректно користується загальноприйнятою науково-технічною термінологією у галузі автоматизації, технічного зору та безпілотної авіації. Важливо відзначити точність використання понять, пов'язаних із обробкою інформативних ознак зображень, стохастичною фільтрацією та системною архітектурою вбудованих обчислювачів.

Окремої позитивної оцінки заслуговує якість ілюстративного матеріалу. Представлені у роботі блок-схеми алгоритмів, діаграми станів скінченного автомата та графіки результатів напівнатурного моделювання виконані на високому технічному рівні. Вони не лише візуально підкріплюють теоретичні положення, а й суттєво полегшують аналіз запропонованих архітектурних рішень, що свідчить про високу професійну підготовку автора та його повагу до культури наукового тексту. Загалом, мова та стиль дисертації повністю відповідають встановленим стандартам і сприяють адекватному розумінню наукового доробку автора.

### **Повнота викладу основних результатів дисертації в публікаціях.**

Результати наукових досліджень висвітлені у 4 наукових публікаціях здобувача, серед яких: 2 статті у наукових виданнях, включених на дату опублікування до переліку наукових фахових видань України; 2 статті у періодичних наукових виданнях, проіндексованих у базах даних Web of Science Core Collection та/або Scopus та віднесених до першого — третього квартилів (Q1–Q3) відповідно до класифікації SCImago Journal and Country Rank або Journal Citation Reports.

Також результати дисертації були апробовані на 3 міжнародних наукових фахових конференціях, які індексуються у науково-метричній базі даних Scopus.

У наукових працях здобувача повною мірою дотримано принципів академічної доброчесності. Усі результати, отримані іншими авторами, супроводжуються належними посиланнями, а використання результатів спільної діяльності з іншими науковцями оформлено згідно з вимогами наукової етики. У текстах публікацій не виявлено ознак плагіату, фальсифікації чи фабрикації даних, що вказує на відповідальний підхід автора до проведення досліджень.

Особистий внесок Білозерського В.О. у роботах, опублікованих у співавторстві, є визначальним. Здобувачем самостійно розроблено математичне забезпечення для попередньої обробки відеоданих, реалізовано алгоритми адаптивного супроводження та проведено комплексні випробування у межах розроблених імітаційних систем. Представлені публікації у сукупності забезпечують повне висвітлення основних положень дисертації, підтверджують наукову новизну та практичну цінність результатів, а також свідчать про сформованість автора як зрілого науковця та фахівця у галузі автоматизації та комп'ютерно-інтегрованих технологій.

### **Недоліки та зауваження до дисертаційної роботи.**

При оцінюванні дисертаційної роботи Білозерського В. О., яка має виражений науково-прикладний характер і високу ступінь готовності до впровадження, вважаю за необхідне висловити наступні зауваження та дискусійні положення:

- Завдання № 3, 4 дослідження наведені автором у вступі та п.1.5 дисертації мають відмінності.

- Стосовно першого розділу: при дослідженні чинників, що впливають на якість формування інформативного поля зображення, автор зосередився переважно на видимій ділянці спектра. Разом з тим, для систем, що підлягають сертифікації як всепогодні, було б доцільно розширити аналіз на інфрачервоний діапазон, оскільки межі ефективності запропонованих морфологічних методів виділення ознак в умовах теплового контрасту об'єктів можуть мати свої специфічні особливості. Також на стор. 26 у другому складнику виразу (1.2) помилково вказано проекцію  $G_x$  замість  $G_y$ .

- У другому розділі, при описі алгоритмів попередньої обробки відеосигналу, недостатньо уваги приділено оцінці впливу високочастотних вібрацій (типових для моторно-пропелерної групи БПЛА) на стабільність роботи детектора віднімання фону. Оскільки вібрації створюють динамічну нестабільність усієї сцени, це може призводити до деградації контрасту «об'єкт-фонове середовище» та вимагати додаткової програмної стабілізації безпосередньо в контурі виявлення.

- У третьому розділі запропонована модель адаптивного супроводження базується на лінійній екстраполяції траєкторії. Проте в роботі не висвітлено питання граничних маневрених характеристик цілі (кутових швидкостей та прискорень), при перевищенні яких кінематична помилка прогнозу вийде за межі розрахованої зони інтересу, що є важливим параметром при визначенні експлуатаційних лімітів системи наведення.

- Методика експериментальних досліджень, викладена у четвертому розділі, базується на стендових випробуваннях із використанням валідаційних відеозаписів. Хоча такий підхід забезпечує відтворюваність результатів, він не повною мірою враховує недетерміновані затримки системного планувальника ОС при роботі у реальному часі, що може впливати на динамічну точність видачі керуючих команд у зацикленому контурі керування.

- Наукові результати дисертації не розкривають значення кількісного показника підвищення точності наведення БПЛА, що задекларовано автором у меті.

Вважаю, що висловлені зауваження не є концептуальними, не зменшують загальної наукової новизни та практичної значимості результатів і не впливають на позитивну оцінку дисертаційної роботи.

### **Висновок про дисертаційну роботу**

Вважаю, що дисертаційна робота здобувача ступеня доктора філософії Білозерського Владислава Олександровича на тему **«Методи та засоби попередньої обробки відеоданих в комплексі завдань наведення БПЛА»** виконана на високому науковому рівні, не порушує принципів академічної доброчесності та є закінченим науковим дослідженням, сукупність теоретичних та практичних результатів якого розв'язує наукове завдання, що має істотне значення для галузі знань 15 Автоматизація та приладобудування. Дисертаційна робота за актуальністю, практичною цінністю та науковою новизною повністю відповідає вимогам чинного законодавства України, що передбачені в п.6–9 «Порядку присудження ступеня доктора філософії та скасування рішення разової спеціалізованої вченої ради закладу вищої освіти, наукової установи про присудження ступеня доктора філософії», затвердженого Постановою Кабінету Міністрів України від 12 січня 2022 р. № 44.

Здобувач Білозерський Владислав Олександрович заслуговує на присудження ступеня доктора філософії в галузі знань у галузі знань 15 Автоматизація та приладобудування за спеціальністю 151 Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології.

### **Офіційний опонент:**

Доктор технічних наук, професор,  
провідний науковий співробітник  
науково-інформаційного відділу  
Державного науково-дослідного інституту  
випробувань і сертифікації озброєння та  
військової техніки

Олег ДМІТРІЄВ