

Відгук офіційного опонента –  
доктора технічних наук, професора Купіна Андрія Івановича  
на дисертацію Мироненка Микити Ігоровича на тему  
«Моделі та методи інформаційної технології машинного навчання автономного  
безпілотного літального апарату для відеомоніторингу місцевості», подану на  
здобуття ступеня доктора філософії за спеціальністю 122 «Комп'ютерні науки»

### **Актуальність теми дослідження**

Розвиток сучасних інформаційних технологій (ІТ) та штучного інтелекту призвів до значного прориву в галузі безпілотної авіації. Використання дронів з інтелектуальним бортовим комплексом дозволяє значно зменшити витрати на охорону, моніторинг навколишнього середовища, патрулювання державних кордонів, на проведення пошукових заходів тощо. Також у сучасних війнах (Нагорний Карабах, Україна, Ізраїль) статистика вражень цілей вже сягає 50%.

Подальшим пріоритетним напрямом розвитку безпілотних авіаційних комплексів є надання безпілотним літальним апаратам (БПЛА) властивості автономності на основі машинного навчання та розпізнавання образів. Практична доцільність створення автономних БПЛА обумовлена як розширенням їх функціональних можливостей, так і підвищенням їх інформаційного та кібернетичного захисту. Водночас створення автономного БПЛА пов'язано з необхідністю розв'язання двох надскладних задач. Це розроблення релевантного інформаційного забезпечення і методів машинного навчання на основі побудови високодостовірних вирішальних правил, інваріантних до багатовимірності словника ознак та алфавіту класів розпізнавання. Крім того, жорсткі обмеження накладаються на оперативність прийняття класифікаційних рішень, оскільки вони приймаються бортовою системою розпізнавання автономного БПЛА в динамічному режимі. Практика показує, що відомі методи інтелектуального аналізу даних (включаючи штучні нейронні мережі, синергетику, еволюційні підходи тощо) при створенні автономних БПЛА не в повній мірі відповідають вищенаведеним вимогам через ускладнення науково-методологічного характеру.

Тому тема дисертаційної роботи, присвячена розробленню моделей і методів інформаційного синтезу на основі машинного навчання бортової системи автономного БПЛА для розпізнавання природних, інфраструктурних та малогабаритних об'єктів, є **актуальною**, має науково-практичне, соціально-економічне значення та безпосередньо сприяє підвищенню обороноздатності України.

### **Наукова новизна результатів дослідження**

Вперше розроблено метод інформаційно-екстремального машинного навчання автономного БПЛА для розпізнавання наземного транспортного засобу з оптимізацією рівня квантування яскравості пікселів кадру зони інтересу, що дозволяє детектувати контур транспортного засобу з метою визначення на ньому центру полярної системи координат. При цьому для формування навчальної матриці та побудови в процесі інформаційно-екстремального машинного навчання автономного БПЛА застосовуються вирішальні правила, інваріантні до зсуву та повороту наземного об'єкту в кадрі зони інтересу.

Вперше розроблено метод інформаційно-екстремального машинного навчання автономного БПЛА для розпізнавання наземних об'єктів з оптимізацією розміру кадру зображення регіону, що дозволяє підвищити функціональну ефективність інформаційно-екстремального машинного навчання БСР через зменшення впливу неінформативних та заважаючих ознак розпізнавання оточуючого середовища наземного об'єкту.

Вперше розроблено метод інформаційно-екстремального машинного навчання автономного БПЛА для семантичної сегментації зображення регіону шляхом оптимізації за інформаційним критерієм вагових коефіцієнтів RGB-компонент зображень наземних об'єктів, що дозволяє підвищити повну ймовірність прийняття правильних класифікаційних рішень у порівнянні з початковими одиничними значеннями вагових коефіцієнтів (як це приймалося в наукових дослідженнях попередників).

Удосконалено метод інформаційно-екстремального машинного навчання автономного БПЛА для відеомоніторингу місцевості за ієрархічною

структурою даних у вигляді декурсивного бінарного дерева, що дозволяє побудувати в процесі машинного навчання із заданою глибиною безпомилкові за навчальною матрицею вирішальні правила. Доведено доцільність реалізації інформаційно-екстремального машинного навчання за ієрархічною структурою даних у вигляді декурсивного бінарного дерева при кількості класів розпізнавання більше двох.

Набув подальшого розвитку метод автономної відеонавігації за наземними природними та інфраструктурними орієнтирами з відомими географічними координатами, що дозволяє визначати місцезнаходження автономного БПЛА без використання глобальної мережі позиціонування GPS і цим підвищити інформаційну та/або кіберзахищеність літального апарату.

### **Практичне значення результатів дисертаційної роботи та зв'язок з науковими програмами та темами**

Дисертаційне дослідження відповідає пріоритетним напрямкам наукових досліджень Сумського державного університету, зокрема держбюджетним науково-дослідним роботам «Бортова система безпілотної літального апарату для автономного розпізнавання наземних малогабаритних об'єктів» (ДР № 0117U002248) та «Інформаційна технологія автономної навігації безпілотної літального апарату за наземними природними та інфраструктурними орієнтирами» (ДР № 0122U000786), у яких здобувач був виконавцем.

На основі запропонованих моделей, методів та алгоритмів здобувачем реалізовано засоби інформаційної технології машинного навчання бортової системи автономного БПЛА для розпізнавання наземних природних, інфраструктурних об'єктів та транспортних засобів. Вони включають модулі формування вхідного математичного опису, машинного навчання, побудови вирішальних правил та функціонування системи в режимах функціонального тестування та екзамену.

Одержані наукові результати досліджень у вигляді інформаційного, алгоритмічного та програмного забезпечення впроваджено в Науково-дослідному центрі ракетних військ і артилерії Збройних сил України при

модернізації тренажера оператора наземної станції керування безпілотним авіаційним комплексом та у навчальний процес Сумського державного університету.

### **Зміст дисертації та відповідність встановленим вимогам**

Дисертація складається із вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел і додатків. Загальний обсяг дисертації складає 221 сторінку, з яких основний текст займає 165 сторінок, список використаних джерел становить 170 найменувань.

Дисертація написана за формально-логічною структурою з дотриманням наукового стилю викладення в ній матеріалів, досліджень, наукових положень та висновків, що забезпечує доступність їх сприйняття.

**Вступ** дисертаційної роботи містить загальну характеристику роботи та обґрунтування актуальності обраної теми досліджень. У вступі сформульована мета та задачі досліджень, розкритий зв'язок роботи з науковими планами, відображена наукова новизна та практична цінність отриманих результатів.

**Перший розділ** дисертації присвячено аналізу сучасного стану та тенденцій розвитку безпілотних авіаційних комплексів. Показано, що перспективним напрямом є надання БПЛА властивості автономності на основі машинного навчання та запропоновано п'ять рівнів його автономності. За результатами аналітичного огляду сучасних інформаційних технологій встановлено, що одним з перспективних шляхів інтелектуального аналізу та розробки бортових систем БПЛА здатних навчатися розпізнаванню наземних об'єктів, є використання ідей і методів вітчизняної прогресивної так званої «інформаційно-екстремальної інтелектуальної технології (або ІЕІ-технології)». Це ІТ інтелектуального аналізу, яка ґрунтується на максимізації інформаційної спроможності системи розпізнавання в процесі машинного навчання.

У **другому розділі** дисертації проаналізовано особливості формування вхідного математичного опису здатної навчатися бортової системи розпізнавання, обґрунтовано вибір методу досліджень і приведено загальну формалізовану задачу розробки бортової системи розпізнавання в рамках ІЕІ-технології. Розроблено комплекс функціональних категорійних моделей

інформаційно-екстремального машинного навчання з оптимізацією параметрів формування вхідного інформаційного опису автономного БПЛА. Також приведено формалізовану постановку задачі і запропоновано функціональну категорійну модель інформаційно-екстремального машинного навчання за ієрархічною структурою даних у вигляді декурсивного бінарного дерева. Це дозволяє перейти від багатокласового лінійного машинного навчання до двохкласового для кожної страти декурсивного дерева.

У **третьому розділі** дисертації розглядається реалізація запропонованих методів інформаційно-екстремального машинного навчання автономного БПЛА для розв'язання задачі семантичної сегментації цифрового зображення регіону спостереження, розпізнавання наземних транспортних об'єктів та оптимізації параметрів формування вхідної навчальної матриці. Зокрема розглянуто процес машинного навчання бортової системи розпізнавання за ієрархічною структурою даних у вигляді декурсивного бінарного дерева. Експериментально доведено, що при кількості класів розпізнавання більше двох необхідно переходити на ієрархічне машинне навчання за структурою даних у вигляді декурсивного бінарного дерева.

**Четвертий розділ** дисертації присвячено створенню системи підтримки прийняття рішень (СППР) для оператора наземної станції керування, який здійснює машинне навчання з використанням стенду-симулятора для створення вхідного інформаційного забезпечення, налагодження та верифікації програмного забезпечення автономного БПЛА для розпізнавання наземних об'єктів за їх зображеннями, отриманими за результатами аеророзвідки. Автором розроблено концептуальну модель, структурну, функціональну схеми та інтерфейси додатків СППР для машинного навчання автономного БПЛА, які відповідають ергономічним принципам. Представлено засоби інформаційної технології проєктування СППР та наведено приклад порівняння результатів інформаційно-екстремального машинного навчання та штучної нейронної мережі із зворотнім поширенням помилки, що підтверджує переваги запропонованого в роботі методу інформаційно-екстремального машинного навчання автономного БПЛА.

Загальні **висновки** до роботи логічно випливають зі змісту дисертації і містять основні наукові та практичні результати дослідження. Головна наукова задача, що вирішена в дисертації, узагальнена в преамбулі. Вважаю важливим наголосити про значущість окремих висновків здобувача для можливих подальших досліджень, а також конкретних шляхів використання отриманих результатів, зокрема в оборонній сфері.

### **Зауваження до дисертаційної роботи**

1. Тему дисертації сформульовано достатньо узагальнено. Слід було для підкреслення оригінальності роботи додати в кінці деякі уточнення з урахуванням головних ідей автора (наприклад, на основі інформаційно-екстремального підходу, декурсивного бінарного дерева тощо).

2. Автором у вступі сформульовано 7 задач для дослідження. Але при цьому робота містить 4 основних розділи. Зазвичай рекомендується узагальнити кількість таких задач відповідно до числа основних розділів.

3. При доведенні актуальності роботи, декларації наукових положень, а також у висновках бажано наводити відповідні чисельні показники, що підкреслюють ефективність застосованих рішень автора (є в основних розділах роботи).

4. Оскільки у першому розділі здійснюється аналітичний огляд наукових результатів попередників, то було б доцільно запропоновану автором класифікацію рівнів автономності безпілотних авіаційних комплексів (стор. 35, 36) перенести із розділу 1.1 у розділ 2.1, де аналізується об'єкт досліджень.

5. У другому розділі дисертаційної роботи запропоновано комплекс функціональних категорійних моделей машинного навчання автономного БПЛА. Водночас варто було б привести визначення та особливості категорійної моделі, а також вказати, які конкретно множини категорій є її елементами.

6. На функціональних категорійних моделях машинного навчання автономного БПЛА множини і оператори позначено прямими та курсивом, що порушує стандарт оформлення дисертаційної роботи.

7. Визначення 2.6.2 (стор. 81) потребує доповнення, оскільки не вказано до якого ярусу декурсивного дерева належить дочірня страта.

8. У дисертаційній роботі варто було б навести результати оцінки оперативності машинного навчання за розробленими методами та їх якісне порівняння з відомими інтелектуальними інформаційними методами аналізу даних, а також розглянути засоби розпаралелювання обчислень.

9. У дисертаційній роботі варто було б надати на рівні рекомендації можливість застосування одержаних результатів машинного навчання бортової системи автономного БПЛА для розпізнавання наземних об'єктів при різних режимах та умовах польоту.

10. У четвертому загальному висновку дисертаційної роботи вказано дещо необґрунтоване обмеження щодо застосування методу машинного навчання автономного БПЛА з оптимізацією вагових коефіцієнтів RGB-компонент для зображення регіону тільки для його семантичної сегментації. Вважаю, що цей метод може бути поширений і на розпізнавання інших малогабаритних наземних об'єктів, включаючи транспортні засоби.

11. При реалізації систем машинного навчання та розпізнавання на автономній бортовій ЕОМ БПЛА у реальному часі критичним питанням може бути її продуктивність. Зважаючи на це варто було навести критерії її вибору.

Разом з тим слід констатувати, що зазначені зауваження переважно носять характер уточнень, доповнень або перспектив подальших досліджень автора. Отже, вони не зменшують наукової цінності поданої до захисту дисертаційної роботи Мироненка Микити Ігоровича. У роботі представлено результати, що однозначно мають як теоретичне, так і практичне значення.

### **Висновок про відповідність роботи встановленим вимогам МОН України**

Дисертація М. І. Мироненка на тему «Моделі та методи машинного навчання автономного безпілотного літального апарату для відеомоніторингу місцевості», подана на здобуття ступеня доктора філософії за спеціальністю 122 «Комп'ютерні науки» є завершеним дослідженням, яке містить низку нових, актуальних та достовірних результатів, що спрямовані на вирішення актуального наукового завдання, яке має як соціально-економічне значення, так і спрямовано на підвищення обороноздатності України.

Під час аналізу дисертаційної роботи випадків порушення академічної доброчесності виявлено не було.

Дисертаційна робота Мироненка Микити Ігоровича за актуальністю проблеми, обсягом, ґрунтовністю аналізу та інтерпретацією отриманих даних, повнотою викладу принципів наукових положень, науково-теоретичним та практичним значенням повністю відповідає вимогам п.6 «Порядку присудження ступеня доктор 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, а здобувач Мироненко Микита Ігорович заслуговує присудження ступеня доктора філософії за спеціальністю 122 «Комп'ютерні науки».

**Офіційний опонент:**

доктор технічних наук, професор,

завідувач кафедри комп'ютерних систем та мереж

Криворізького національного університету МОНУ



Андрій КУПШ

