

## **ВІДГУК**

офіційного опонента доктора технічних наук, старшого наукового співробітника Мавренкова Олексія Єфремовича на дисертаційну роботу Нікітіна Артема Олексійовича на тему “Моделі та засоби інтелектуального комп’ютерного синтезу систем керування безпілотними літальними апаратами”, представлену на здобуття наукового ступеня доктора філософії в галузі знань 17 Електроніка, автоматизація та електронні комунікації за спеціальністю 173 Авіоніка

### **Актуальність теми.**

Очевидним є той факт, що сьогодення наукової та науково-технічної діяльності сфокусовано на революційному розвитку роботизованих (безпілотних) систем, зокрема безпілотних авіаційних комплексів, які застосовуються в різноманітних галузях – від моніторингу навколишнього середовища, точного землеробства, логістики та будівництва до пошуково-рятувальних операцій та інспекції інфраструктури, але, в першу чергу, як ефективний військовий інструмент у протидії російському агресору.

У цьому контексті, зважаючи на умови воєнного стану в державі, вимагається оперативне прийняття раціональних конструкторських (технічних) рішень у процесі проєктування (розроблення, удосконалення) та виробництва безпілотних літальних апаратів (БПЛА).

Одним із сучасних і перспективних елементів системи підтримки прийняття оптимальних рішень в процесі проєктування БПЛА є формалізація процедур ідентифікації параметрів математичних моделей функціонування БПЛА та синтезу алгоритмів їх систем автоматичного керування на основі сучасних методів машинного навчання, що значною мірою дозволяють скоротити часові рамки проєктувальних робіт і підвищити функціональність БПЛА в цілому.

Тому тема дисертаційної роботи Олександра Нікітіна, яку присвячено розробленню (удосконаленню) прогресивних методів ідентифікації математичних моделей динаміки руху та синтезу інтелектуальних систем керування БПЛА на основі впровадження алгоритмів машинного навчання (нейронних мереж, генетичних алгоритмів, нечіткої логіки), є актуальною та своєчасною.

### **Зміст та оформлення дисертаційної роботи.**

Дисертацію підготовлено державною мовою. Вона складається з анотації, переліку умовних позначень і скорочень, вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел (135 позицій) та двох додатків.

В анотації належним чином викладено основний зміст дисертаційної роботи, представлено основні результати дослідження із зазначенням наукової новизни та науково-практичного значення, представлено список публікацій здобувача за темою дисертації.

У вступі подано загальну характеристику дисертації, зокрема, обґрунтовано актуальність теми, визначено мету, завдання, об’єкт і предмет

дослідження, окреслено методологічне підґрунтя роботи, наукову новизну та науково-практичне значення отриманих результатів, особистий внесок здобувача, апробацію матеріалів дисертації, наведено структуру та обсяг дисертації (загальний обсяг дисертації складає 247 сторінок).

У *першому розділі* проаналізовано стан і проблемні питання розроблення БПЛА та їх систем автоматичного керування, актуальні результати досліджень і наукові публікації за тематикою дисертації. Обґрунтовано вибір напрямку дослідження, постановлено завдання дисертаційного дослідження й обґрунтуванню підходи до їх розв'язання.

Ознайомлення з текстом розділу засвідчує, що Нікітін А.О. критично опрацював доступний масив наявних вихідних даних з порушеної проблематики, визначив основне та часткові завдання дослідження, сформував логіко-структурну схему їх вирішення.

У *другому розділі* відповідно до визначених завдань дослідження розглянуто питання математичного моделювання динаміки руху БПЛА, представлено результати розроблення та аналізу нелінійних математичних моделей основних типів БПЛА та їх підсистем (гвинтомоторної групи).

Під час розроблення зазначених математичних моделей здобувачем доводиться, що традиційні моделі твердого тіла не повністю враховують динаміку руху, тому запропоновано нелінійну математичну модель просторового руху БПЛА на базі рівнянь Ейлера-Лагранжа.

У *третьому розділі* представлено результати розроблення програмного модуля для дослідження систем автоматичного керування БПЛА, програмних засобів для ідентифікації параметрів математичних моделей БПЛА, що сприяє синтезу інтелектуальних алгоритмів керування.

Розроблений програмний модуль покладено в основу прототипу програмно-апаратного комплексу для ідентифікації об'єктів керування та синтезу систем керування. При цьому використано комплексні моделі руху, алгоритми машинного навчання та нейронні мережі, що забезпечує автоматизацію ідентифікації та адаптацію до змінних режимів польоту БПЛА. Показано, що розроблена математична модель з високою точністю відтворює динаміку польоту реального БПЛА.

*Четвертий розділ* присвячено експериментальному дослідженню розробленого програмного модуля в частині ідентифікації параметрів математичної моделі динаміки руху БПЛА та синтезу системи автоматичного керування, представлено результати верифікації результатів ідентифікації.

Здобувачем оцінено адекватність моделі метриками MSE, RMSE, MAE, Max Error, NRMSE та кореляцією Пірсона, виконано верифікацію на нових даних, представлено практичні результати розроблення засобів ідентифікації параметрів нелінійної моделі БПЛА та синтезу інтелектуальних алгоритмів керування.

Здобувачем доводиться, що використання розробленого ним науково-методичного апарату дозволяє зменшити тривалість налаштування законів керування, а отже зменшити часові рамки проектування, знизити сукупні витрати на розробку.

У висновках, викладено найбільш важливі наукові та науково-практичні результати дисертації, вказано наукові проблеми, для розв'язання яких можуть бути застосовані результати дослідження.

Висновки свідчать, що Нікітіну А.О. вдалося розв'язати наукові завдання, поставлені у роботі, на належному науковому рівні.

Додатки містять список публікацій здобувача за темою дисертації та акти впровадження результатів його дисертаційного дослідження.

Структура дисертації відповідає “Вимогам до оформлення дисертації”, затвердженим наказом Міністерства освіти і науки України від 12.01.2017 № 40 (зі змінами).

**До основних нових наукових результатів дисертації слід віднести таке:**

1. Удосконалено метод ідентифікації параметрів повної нелінійної математичної моделі просторового руху БПЛА за рахунок використання генетичного алгоритму, що забезпечило можливість параметричної ідентифікації нелінійних моделей за умови наявності необхідних обчислювальних потужностей, що дозволило підвищити точність відтворення динаміки реального об'єкта та створило передумови для побудови високоточних адаптивних систем автоматичного керування.

2. Удосконалено метод синтезу систем автоматичного керування БПЛА за рахунок впровадження нейромережових алгоритмів та методів нечіткої логіки для формування законів керування та передавальних чисел, що, на відміну від традиційних підходів, дозволило забезпечити адаптивність системи автоматичного керування, її здатність до самоналаштування при зміні параметрів БПЛА та умов польоту.

3. Набув подальшого розвитку принцип формування повної нелінійної математичної моделі просторового керованого руху БПЛА, що ґрунтується на поєднанні параметричної ідентифікації динаміки об'єкта керування та інтелектуального синтезу алгоритмів системи автоматичного керування. Це на відміну від існуючих підходів, забезпечує моделювання динаміки БПЛА у широкому діапазоні режимів польоту з урахуванням особливостей функціонування системи автоматичного керування та дозволяє запроваджувати механізм оновлення параметрів об'єкта під час польоту.

4. Набув подальшого розвитку науково-методичний підхід до проєктування БПЛА шляхом створення модульного програмно-апаратного комплексу з відкритим кодом для моделювання, ідентифікації та інтелектуального синтезу систем автоматичного керування, який, на відміну від існуючих рішень, забезпечує оперативну зміну конструкційних і алгоритмічних параметрів, що дозволяє швидко формувати прототипи систем автоматичного керування БПЛА, підвищує ефективність експериментальних досліджень та скорочує час розроблення і тестування таких систем.

## **Оцінка обґрунтованості наукових положень, висновків і рекомендацій, сформульованих в дисертаційній роботі.**

В роботі застосовані наступні методи: математичного та комп'ютерного моделювання; параметричної ідентифікації; теорії автоматичного керування, машинного навчання (нейронні мережі, генетичні алгоритми, теорії оптимізації (нечітка логіка).

Математичні моделі та залежності, які розроблено, відповідають або загальноприйнятим, або коректно отримані в роботі самостійно, доведено їх адекватність. Висновки та рекомендації базуються на результатах моделювання та не виходять за межі прийнятих припущень та обмежень. Таким чином, положення, висновки і рекомендації, наведені в дисертаційній роботі Артема Нікітіна, в достатній мірі обґрунтовані на належному науковому рівні.

## **Достовірність результатів досліджень.**

Достовірність результатів теоретичних досліджень підтверджується коректністю використання методів дослідження, результатами чисельного моделювання та збігом результатів із загальнотеоретичним уявленням та натурними експериментами.

Додатковим підтвердженням достовірності є також позитивний результат впровадження результатів дисертаційного дослідження у навчальний процес Національного аерокосмічного університету “Харківський авіаційний інститут” та практичну діяльність розробника безпілотних авіаційних комплексів ТОВ НВК “СКАЙ АССИСТ”.

## **Практичне значення одержаних результатів.**

Практичне значення отриманих результатів полягає у використанні:

- теоретичних положень дисертації при викладанні навчальних дисциплін, виконанні лабораторних робіт, виконанні курсових і кваліфікаційних робіт магістрів за спеціальністю 174 “Автоматизація, комп'ютерні інтегровані технології та робототехніка” у навчальному процесі Національного аерокосмічного університету “Харківський авіаційний інститут” (Акт впровадження затверджено проректором з науково-педагогічної роботи Національного аерокосмічного університету “Харківський авіаційний інститут”);

- запропонованого в дисертації прототипу програмно-апаратного комплексу у виробничому процесі ТОВ НВК “СКАЙ АССИСТ” для створення демонстраційних зразків БПЛА, полунатурного моделювання роботи бортового обладнання в польоті та налагодження автономних систем навігації та керування (Акт впровадження затверджено Головою наглядової ради ТОВ НВК “СКАЙ АССИСТ”).

## **Повнота викладення результатів досліджень в опублікованих працях.**

Наукові результати дисертації висвітлено у 13 (тринадцяти) наукових публікаціях:

- 3 (три) статті, з яких 2 (дві) статті опубліковано у наукових виданнях,

включених на дату опублікування до переліку наукових фахових видань України, 1 (одна) стаття – у періодичному науковому виданні, проіндексованому у базі даних Scopus та віднесеному до третього квартилю (Q3);

– 3 (три) матеріали доповідей на міжнародних наукових конференціях, опублікованих у збірниках матеріалів конференцій, проіндексованих у базі даних Scopus;

– 7 (сім) тез доповідей на міжнародних науково-практичних конференціях.

Зміст і кількість наукових публікацій за темою дисертації відповідають вимогам пункту 8 "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 12.01.2022 № 44 (зі змінами).

#### **Академічна доброчесність.**

За результатами аналізу дисертації порушень здобувачем вимог та норм академічної доброчесності не виявлено.

#### **Зауваження щодо змісту дисертаційної роботи.**

1) Не зазначено особистий внесок кожного автора для статей, опублікованих у співавторстві.

2) У роботі вводиться поняття “повна математична модель”. При цьому тлумачення цього поняття не наведено.

3) У додатку А не вказано форму участі здобувача в конференціях.

4) У розділі 1 аналіз розробок БПЛА, в яких впроваджувалися інтелектуальні моделі та адаптивні алгоритми керування, представлено досить загально та стисло, що дещо знижує науковий рівень виконання одного з часткових завдань дослідження.

5) У розділі 1 (с. 45) здобувач стверджує про “відсутність системного підходу до розробки та застосування БПЛА”. При цьому обґрунтування такого твердження не наводить.

6) У розділі 2 (зокрема на с. 76) використовується застарілий термін “центр ваги ЛА”. Коректним є термін “центр мас ЛА”.

7) Висновок за розділом 1 (четвертий дефіс) вказано помилково – він відноситься до розділу 4.

8) Розділ 4 (п. 4.2) переобтяжено зайвою інформацією про опис прототипу квадрокоптера, що обирається для проведення експерименту.

9) У висновках не викладено напрями продовження досліджень за тематикою дисертації.

Зазначені недоліки та зауваження не є критичними для наукових результатів, отриманих у дисертації, і не виключають загальну позитивну оцінку роботи.

### **Висновки.**

За результатами моєї власної оцінки зроблено такі основні висновки:

- 1) дисертацію виконано на належному науковому рівні;
- 2) наукові публікації здобувача достатньою мірою висвітлюють отримані в дисертації наукові результати та мають належний науковий рівень;
- 3) дисертація містить нові науково обґрунтовані результати проведених здобувачем досліджень, які виконують конкретне наукове завдання щодо удосконалення методів ідентифікації параметрів математичних моделей просторового руху БПЛА та алгоритмів синтезу законів їх керування, що має істотне значення для галузі знань 17 Електроніка, автоматизація та електронні комунікації;
- 4) отримані в дисертації результати досліджень є достатньо науково обґрунтованими та відповідають темі дисертації;
- 5) виконання поставленого наукового завдання виконано на належному науковому рівні.

За результатами аналізу отриманих у дисертації наукових результатів і особистого спілкування із здобувачем з питань підготовки його дисертації підтверджую добрий рівень оволодіння Артемом Нікітіним методологією наукових досліджень.

Дисертація Нікітіна Артема Олексійовича на тему “Моделі та засоби інтелектуального комп’ютерного синтезу систем керування безпілотними літальними апаратами” в основному відповідає встановленим вимогам до дисертацій на здобуття ступеня доктора філософії за спеціальністю 173 Авіоніка та може бути представлена до публічного захисту.

### **Офіційний опонент**

провідний науковий співробітник науково-дослідного відділу (розробки і модернізації бортового обладнання і систем повітряної розвідки) науково-дослідного управління (розвитку і модернізації військової авіаційної техніки) Державного науково-дослідного інституту авіації  
доктор технічних наук, старший науковий співробітник

Олексій МАВРЕНКОВ