

## **ВІДГУК**

### **офіційного опонента**

д-ра техн. наук, професора, завідувача кафедри комп'ютеризованих систем  
управління Національного університету кораблебудування ім. адмірала Макарова  
Черно Олександра Олександровича

на дисертаційну роботу Солодчука Максима Олександровича на тему:  
«Електромеханічна система двокоординатного позиціонування допоміжної  
відеокамери безпілотного літального апарату», подану на здобуття наукового  
ступеня доктора філософії за спеціальністю 141 Електроенергетика,  
електротехніка та електромеханіка

#### **Актуальність обраної теми дисертаційного дослідження**

Зростання ролі безпілотних авіаційних комплексів (БпАК) у задачах моніторингу та розвідки вимагає вдосконалення засобів оптичного спостереження. Однією з головних проблем є «інформаційне перевантаження» оператора та неможливість одночасного огляду великої території і детального розгляду окремих об'єктів. Запропонована у дисертації концепція використання допоміжної камери з автоматизованим наведенням дозволяє розв'язати це протиріччя. Автоматизація процесу наведення на основі аналізу зображення дозволяє виключити людський фактор з контуру керування положенням камери, що підвищує загальну ефективність виконання польотних завдань.

#### **Оцінка обґрунтованості та достовірності наукових положень, висновків і рекомендацій, їх відповідності темі дисертації**

Наукові результати базуються на системному підході до проектування електромеханічних систем. Автор логічно пов'язує параметри оптичної системи, алгоритми комп'ютерного зору та динаміку електропривода. Коректність отриманих результатів підтверджується використанням апробованих методів дослідження, зокрема імітаційного моделювання та напівнатурних випробувань (Hardware-in-the-Loop). Використання валідованих бібліотек (Dynamixel Library for MATLAB) та стандартних метрик оцінки точності детектування (mAP, IoU)

свідчить про достовірність отриманих даних.

Отримані в роботі наукові та практичні результати повністю відповідають темі дисертації та в сукупності розв'язують поставлене в ній наукове завдання.

### **Структура і зміст дисертаційної роботи**

Дисертація складається зі вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел та додатків. Загальний обсяг роботи становить 208 сторінок, основний текст викладено на 163 сторінках. Робота ілюстрована 73 рисунками та містить 3 таблиці.

У **першому розділі** проведено аналіз існуючих оптичних систем безпілотних літальних апаратів (БПЛА), їх апаратних та програмних засобів, алгоритмів роботи. Виявлено недоліки існуючих систем, зокрема наявність «зони нерозвідки», нераціональний з точки зору енергоефективності та стабільності алгоритм безперервного наведення камери. Сформульовано мету дисертаційного дослідження.

У **другому розділі** обґрунтовано доцільність розділення каналів виявлення та ідентифікації. Розроблено структуру системи, яка включає взаємодію навігаційної та допоміжної камер. Вдосконалено метод формування дискретних команд позиціонування електропривода з урахуванням параметрів польоту БПЛА. Розроблено імітаційну модель електромеханічної системи позиціонування допоміжної камери за кутом riskання. Здійснено вибір апаратних та програмних засобів бортового детектора об'єктів. Здійснено оцінку підвищення ефективності виявлення об'єктів оптоелектронними системами БПЛА.

**Третій розділ** присвячено питанням технічної реалізації системи позиціонування допоміжної відеокамери БПЛА, а також моделюванню та синтезу системи керування. Обрано бортове радіоелектронне обладнання, розроблено програмно-алгоритмічне забезпечення попередньої обробки та аналізу зображень для формування команд електромеханічній системі. Розроблено математичну та імітаційну моделі керованого електропривода позиціонування додаткової камери. Проведено аналіз ефективності запропонованого в роботі дискретного позиціонування відеокамери у порівнянні з безперервним трекінгом.

У четвертому розділі описано проведені експериментальні дослідження електромеханічної системи позиціонування допоміжної відеокамери БпЛА. Наведено результати тестування детектора об'єктів на реальних та синтетичних зображеннях. Підтверджено здатність системи працювати в режимі, наближеному до реального часу, та забезпечувати точне наведення камери на об'єкт інтересу.

### **Наукова новизна одержаних результатів**

1. Отримав подальший розвиток метод дискретного (подієвого) наведення камери шляхом удосконалення моделі прийняття рішень, яке полягає у введенні процедури виділення зони інтересу та її оцінюванні за інформативними ознаками на основі аналітичного розрахунку кутових координат із використанням геометричного зонування зображення, що забезпечує орієнтацію камери не лише на геометрично визначену ціль, а на найбільш значущу ділянку сцени.

2. Шляхом математичного та імітаційного моделювання процесів у електромеханічній системі позиціонування відеокамери під час наведення, отримано динамічні та енергетичні характеристики для двох підходів: безперервного трекінгу та дискретного наведення і обґрунтовано доцільність застосування останнього, як такого, що забезпечує на порядок менші енергетичні витрати і нівелює дестабілізуючий вплив транспортного запізнювання відеосигналу.

### **Теоретичне та практичне значення результатів дисертаційного дослідження**

Розроблений програмно-апаратний комплекс 2DCAM є готовим інструментом для дослідження алгоритмів керування оптичними приладами. Запропоновані рішення дозволяють реалізувати обробку відеопотоку та керування приводами на бортових обчислювачах з обмеженими ресурсами. Результати роботи впроваджено у навчальний процес НУ «Чернігівська політехніка» та у розробку безпілотних літальних апаратів профільними підприємствами: ТОВ «БЕЗПЛОТНІ ТЕХНОЛОГІЇ» та ТОВ «Бойові Птахи України».

## **Повнота викладення наукових результатів дисертації в опублікованих працях**

Отримані в дисертації результати опубліковано у 7 наукових працях, з яких 3 статті у фаховому науковому виданні категорії «Б» за спеціальністю 141 (в різних номерах журналу), 3 – у періодичному виданні, що індексуються Scopus (в різних випусках). В публікаціях повністю відображено наукові результати дисертації.

За темою дисертації опубліковано також наукові праці, що засвідчують апробацію результатів роботи на 7 наукових конференціях.

## **Оцінка рівня виконання поставленого наукового завдання та оволодіння здобувачем методологією наукової діяльності**

Поставлене в дисертації науково-прикладне завдання розв'язане у повному обсязі на високому науково-технічному рівні, що відповідає рівню дисертації доктора філософії. Успішне застосування автором сучасних науково-прикладних методів, зокрема, технологій штучних нейромереж і технічного зору, для задач керування електромеханічними системами, а також проведення ним експериментальних досліджень із використанням сучасного апаратного та програмного забезпечення, свідчать про достатньо глибоке оволодіння здобувачем методологією наукової діяльності і здатність до проведення наукових досліджень на рівні доктора філософії в галузі електричної інженерії.

## **Дотримання норм академічної доброчесності**

Аналіз роботи свідчить про дотримання норм академічної доброчесності. Посилання на джерела наявні, плагіату не виявлено. Особистий внесок здобувача у спільних працях чітко визначений.

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

1. В розділі 4 зроблено висновок, що результати експерименту підтверджують адекватність математичної моделі та результатів імітаційного моделювання (с. 161, 171), хоча в роботі відсутні статистична обробка

експериментальних даних, аналіз похибок і кількісні порівняння з результатами моделювання. Також відсутня кількісна оцінка показників якості керування.

2. Твердження, що у статичному режимі струм двигуна витрачається на подолання статичного моменту тертя підвісу (с. 144) є некоректним з точки зору фізики процесів. Тому що в режимі утримання (в кінці перехідного процесу після зупинки), про який іде мова, електромагнітний момент двигуна урівноважує зовнішні моменти, прикладені з боку навантаження, обумовлені, в основному, силами тяжіння та інерції. При цьому статичний момент тертя або відсутній, або спрямований зустрічно зовнішнім моментам, тобто в тому самому напрямку, що і момент двигуна (тут він може тільки зменшувати струм, або ніяк не впливати). А подолання статичного моменту тертя, що супроводжується підвищенням струму, відбувається тільки на початку руху (що не можна назвати статичним режимом).

3. У висновках до розділу 3 зазначено: "Удосконалено математичну модель електромагнітного привода позиціонування, яка, на відміну від спрощених аналогів, розглядає двигун як об'єкт керування 3-го порядку (за кутом) та враховує залежність динаміки електромеханічних процесів у колах якоря, а також збурення від моменту тертя.". Але математичні моделі 3-го порядку, що описують процеси у двигунах постійного струму, давно відомі.

4. В описі моделі визначення кута повороту ротора BLDC-двигуна (с. 135) зазначено, що в ній використовується ПД-регулятор. Але на відповідній схемі (рис. 3.23) в обох контурах (положення та швидкості) використовуються ПІ-регулятори.

5. Недоліки оформлення. В тому числі:

– багаторазові повтори одних і тих самих тверджень. Наприклад, про одні й ті самі переваги використання окремої допоміжної камери написано як мінімум 4 рази: с. 74, 81, 113-114, 118. Також речення "Водночас для великих переміщень підвісу (наприклад, при різкій зміні зони інтересу на протилежний край кадру) час позиціонування може досягати 1 с." повторюється двічі: на с. 144 і 147;

– на рис. 3.22 наведено графік зміни швидкості, а підписаний він як перехідний процес прискорення.

Висловлені зауваження не є критичними і не впливають на загальну позитивну оцінку роботи.

### **Загальні висновки та оцінка дисертації**

Представлена дисертація Солодчука Максима Олександровича «Електромеханічна система двокоординатного позиціонування допоміжної відеокамери безпілотного літального апарату» за рівнем отриманих наукових результатів, змістом та обсягом є закінченою науковою працею, в якій отримані нові вагомі науково обґрунтовані теоретичні, експериментальні та практичні результати, що в сукупності розв'язують актуальне науково-прикладне завдання підвищення ефективності пошукових місій та зменшення навантаження на пілота-оператора безпілотного літального апарату.

Дисертаційна робота Солодчука М.О. за змістом, одержаними науковими результатами та їх практичним впровадженням відповідає вимогам «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 №44 від 12.01.2022 р., і «Вимогам до оформлення дисертації», затвердженим наказом МОН України №40 від 12.01.2017 р., а її автор, Солодчук Максим Олександрович, заслуговує присудження наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка.

### **Офіційний опонент:**

Д-р техн. наук, професор,  
зав. кафедри комп'ютеризованих систем управління  
Національного університету кораблебудування  
імені адмірала Макарова

Черно О.О.