

ВІДГУК

офіційного опонента

*(кандидата технічних наук, старшого дослідника,
начальника науково-дослідного відділу науково-технічного супроводження
життєвого циклу Державного науково-дослідного інституту авіації
СТЕШЕНКА Петра Миколайовича)*

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

Сучасні умови експлуатації безпілотних літальних апаратів (БПЛА) вимагають підвищення ефективності виконання розвідувальних та пошукових операцій. Критичним фактором при цьому стає психофізіологічне навантаження на оператора, який змушений обробляти великі масиви відеоінформації в реальному часі. Існуючі системи з однією камерою мають суттєвий недолік – необхідність переривання сканування місцевості для детальної ідентифікації об'єкта, що призводить до появи «зон нерозвідки». Дисертаційна робота Солодчука М.О. спрямована на вирішення цієї проблеми шляхом створення електромеханічної системи позиціонування окремої допоміжної камери. Такий підхід дозволяє автоматизувати процес наведення на основі машинного зору, що є актуальним науково-прикладним завданням у галузі електромеханіки та автоматизації.

Оцінка обґрунтованості та достовірності наукових положень, висновків і рекомендацій

Наукові положення, висновки та рекомендації, сформульовані в дисертації, є достатньо обґрунтованими. Достовірність результатів забезпечується коректним використанням методів математичного моделювання, теорії автоматичного

керування та системного аналізу. Автор використовує сучасний математичний апарат для опису динаміки безколекторних двигунів постійного струму (БДПС) у складі триконтурної системи регулювання. Адекватність розроблених моделей підтверджена збіжністю результатів комп'ютерного симулювання у середовищі MATLAB/Simulink та натурних експериментів на розробленому програмно-апаратному комплексі 2DCAM. Розбіжність між теоретичними та експериментальними даними знаходиться в межах допустимої похибки інженерних розрахунків.

Структура і зміст дисертаційної роботи

Дисертація складається із вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел з 137 найменувань та 3 додатків. Загальний обсяг роботи становить 194 сторінки, в тому числі 161 сторінка основного змісту, 68 рисунків, 6 таблиць.

У першому розділі здійснено аналіз особливостей оптичної локації та інструментарію БпЛА. Автором проаналізовано типові схеми пошуку («паралельні галси», «змійка») та доведено, що використання однієї камери призводить до втрати до 1,6% площі розвідки для комплексів класу PD-2, а для тактичних дронів цей показник може сягати 15% . Обґрунтовано необхідність автоматизації процесів виявлення для підвищення ефективності пошуку.

У другому розділі обґрунтовано структуру та методи керування системою. Запропоновано концепцію використання окремої допоміжної камери на керованому підвісі. Розроблено метод геометричного зонування зображення, який дозволяє формувати дискретні команди позиціонування для електроприводів, що спрощує алгоритм наведення та підвищує швидкодію системи.

Третій розділ присвячено розробці принципів побудови складових системи. Удосконалено математичну модель електроприводу на базі БДПС, яка враховує специфіку триконтурного керування (струм, швидкість, положення) в умовах обмежених ресурсів. Проведено синтез регуляторів, що забезпечують аперіодичний перехідний процес без перерегулювання. Також обґрунтовано вибір

нейронної мережі YOLOv4-tiny для задачі детектування.

У четвертому розділі наведено результати експериментальних досліджень. Описано створення програмно-апаратного комплексу 2DCAM, який реалізує технологію напівнатурного моделювання. Експериментально підтверджено точність відпрацювання цілевказівок у діапазоні кутів $\pm 150^\circ$ та адекватність розроблених моделей приводів.

Наукова новизна одержаних результатів

Наукова новизна роботи полягає у вдосконаленні методів керування електромеханічними системами позиціонування в умовах обмежених обчислювальних ресурсів БПЛА.

Основні положення дослідження, розроблені здобувачем, які становлять його наукову новизну, полягають у наступному:

Вперше:

- запропоновано структуру електромеханічної системи наведення з функціональним розв'язкою каналів виявлення та ідентифікації, яка базується на взаємодії фіксованої ширококутної камери та електроприводу позиціонування допоміжної камери. Це дозволило, на відміну від систем з варіофокальними об'єктивами, усунути явище «зон нерозвідки» під час масштабування, оптимізувати режим роботи електроприводу та забезпечити безперервний моніторинг місцевості;

- розроблено метод формування керуючого впливу (завдання) на позиціонування електроприводу, який, на відміну від існуючих, використовує аналітичний розрахунок кутових координат на основі геометричного зонування зображення з врахуванням поточної висоти польоту та кута нахилу оптичної осі навігаційної камери. Це дозволило синтезувати алгоритм автоматичної компенсації кінематичних похибок наведення без використання додаткових датчиків зворотного зв'язку в контурі положення.

Удосконалено:

- математичну модель електроприводу системи позиціонування (на базі

БДПС), яка відрізняється врахуванням нелінійностей навантаження на валу та дискретності обробки сигналу в триконтурній системі керування. Використання цієї моделі дозволило підвищити точність моделювання динамічних процесів відпрацювання малих переміщень (у межах 1-20 мс) та обґрунтувати параметри регуляторів.

Набув подальшого розвитку:

- закон керування слідкувальним електроприводом на основі квазіоптимального за швидкодією регулятора, адаптованого до змінного темпу надходження координат від системи технічного зору. Це дозволило забезпечити аперіодичний характер перехідних процесів (без перерегулювання), зменшити динамічну похибку та знизити енергоспоживання виконавчого механізму в режимі утримання цілі.

Теоритичне та практичне значення результатів дисертаційного дослідження

Теоритична та практична цінність роботи полягає у створенні інженерної методики проєктування енергоефективних систем наведення. Розроблено та експериментально перевірено комплекс 2DCAM, що підтверджує можливість реалізації запропонованих алгоритмів на доступній елементній базі. Результати впроваджено у діяльність профільних підприємств:

- ТОВ «БЕЗПІЛОТНІ ТЕХНОЛОГІЇ», а саме використано розроблену систему керування допоміжними оптичними засобами, яка функціонує на підставі аналізу сигналів зображення та забезпечує автоматизоване позиціонування камери в реальному часі. Це дозволило підвищити ефективність виявлення та ідентифікації об'єктів, зменшити час реакції оператора й оптимізувати роботу комплексу в умовах динамічних змін сцени.

- ТОВ «Бойові Птахи України», а саме результати досліджень використано при розробці систем керування оптичними засобами безпілотних авіаційних комплексів. Впровадження запропонованих рішень сприяло вдосконаленню алгоритмів наведення та підвищенню загальної ефективності

виконання польотних завдань.

Окрім цього впроваджено в навчальний процес у Національному університеті «Чернігівська політехніка», а саме матеріали дисертаційної роботи впроваджені в навчальний процес при викладанні дисциплін «Теорія електропривода», «Мікропроцесорна техніка» та «Системи відображення інформації». Теоретичні та практичні напрацювання використовуються у підготовці здобувачів вищої освіти за спеціальностями 171 «Електроніка» та 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка».

Повнота викладення наукових результатів дисертації в опублікованих працях

Основні наукові результати дисертаційної роботи з достатньою повнотою викладені у 7 наукових працях, які розкривають зміст виконаних досліджень. Серед них 3 статті опубліковані у періодичних наукових фахових виданнях України, що входять до категорії «Б», та 3 праці – у виданнях, що індексуються у міжнародній наукометричній базі Scopus. Опубліковані праці повною мірою відображають ключові аспекти дисертації, зокрема: обґрунтування структури електромеханічної системи, розробку математичних моделей електроприводів та синтез регуляторів, а також результати експериментальних досліджень на програмно-апаратному комплексі. Результати досліджень пройшли апробацію на 9 науково-технічних конференціях (сім міжнародних та дві всеукраїнські), що підтверджено відповідними тезами доповідей. Кількість та рівень публікацій відповідають вимогам п. 8 «Порядку присудження ступеня доктора філософії...».

Дотримання норм академічної доброчесності

Аналіз змісту дисертаційної роботи та опублікованих наукових праць дає підстави стверджувати, що дослідження виконано здобувачем самостійно. У дисертації відсутні ознаки академічного плагіату, самоплагіату, фабрикації чи фальсифікації даних. Всі використані ідеї, результати та текстові запозичення інших авторів супроводжуються посиланнями на відповідні першоджерела. У працях, опублікованих у співавторстві, особистий внесок здобувача чітко

визначений та полягає у розробці моделей, алгоритмів керування, проведенні моделювання та експериментальних досліджень. Дисертація відповідає принципам академічної доброчесності та нормам етики наукових досліджень.

Недоліки та зауваження до дисертаційної роботи

При загальній позитивній оцінці роботи слід відзначити деякі недоліки:

- у другому розділі, при обґрунтуванні структури системи, автор робить акцент на геометричному зонуванні зображення, проте недостатньо уваги приділено аналізу впливу вібрацій корпусу БПЛА на точність відпрацювання завдання електроприводом у динаміці.
- при синтезі системи керування (розділ 3) використано модель двигуна як об'єкта третього порядку. Було б доцільно навести порівняння з моделлю другого порядку для обґрунтування необхідності саме такої складності.
- в експериментальній частині (розділ 4) наведено результати для лабораторного стенду. Хотілося б побачити більш детальну оцінку енергоспоживання системи в умовах реального польоту при дії аеродинамічного опору на підвіс камери.

Загальні висновки та оцінка дисертації

Підсумовуючи раніше наведені твердження, можна стверджувати, що дисертаційна робота на тему «Електромеханічна система двокоординатного позиціонування допоміжної відеокамери безпілотного літального апарату» є детально пропрацьованою, завершеною роботою, яка має наукову новизну і достовірні результати.

Дослідження, яке було проведено в рамках дисертаційної роботи, відповідає спеціальності 141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка.

За змістом, структурою, обсягом та оформленням дисертаційна робота відповідає вимогам наказу МОН України №40 від 12.01.2017 р. «Про затвердження Вимог до оформлення дисертації» (зі змінами) та «Про затвердження 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 січня 2022 р.

Враховуючи вищезазначене можна зробити однозначний висновок, що Солодчук Максим Олександрович – автор дисертації на тему «Електромеханічна система двокоординатного позиціонування допоміжної відеокамери безпілотного літального апарату» – заслуговує на присудження ступеня доктор філософії за спеціальністю 141 “Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка”.

Офіційний опонент:

кандидат технічних наук, старший дослідник,
Начальник науково-дослідного відділу
науково-технічного супроводження життєвого циклу
Державного науково-дослідного інституту авіації
СТЕШЕНКО Петро Миколайович