

РЕЦЕНЗІЯ

к.т.н., доцента, проректора з наукової роботи

Національного університету "Чернігівська політехніка"

Прийшли Анатолія Леонідовича

на дисертаційну роботу Солодчука Максима Олександровича

на тему «Електромеханічна система двокоординатного позиціонування

допоміжної відеокамери безпілотного літального апарата»,

подану на здобуття наукового ступеня доктора філософії

за спеціальністю «141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»

Актуальність теми дисертації

Розвиток сучасних безпілотних літальних апаратів (БПЛА) висуває нові, принципово складніші вимоги до бортових електромеханічних систем. Якщо у класичних застосуваннях електропривода критеріями якості були здебільшого статична точність та швидкодія, то на борту БПЛА до цих критеріїв жорстко додаються масогабаритні обмеження, обмеження бортової електроенергетичної системи (автономного джерела живлення), необхідність функціонування в умовах суттєвих зовнішніх збурень (вібрацій, перевантажень, електромагнітних завад) та забезпечення прецизійного позиціонування рухомих оптичних елементів за командами з істотним транспортним запізнюванням. У сукупності це формує самостійну задачу синтезу спеціалізованих електроприводів позиціонування для бортових систем БПЛА.

Гіростабілізовані платформи з допоміжною (точковою) відеокамерою, що набули поширення в оптико-електронному обладнанні БПЛА, є типовим прикладом такого електромеханічного об'єкта керування. Класичні робастні методи, що теоретично здатні забезпечити безперервне утримання цілі, на практиці мають низку фундаментальних проблем саме електромеханічного характеру: вищі гармоніки струму у фазних обмотках електродвигуна, безперервне високочастотне перемикання силових ключів інвертора, а звідси — підвищені втрати в обмотках та силових ключах, перегрів інвертора, зниження ресурсу електромеханічної системи та надмірне споживання енергії з бортового акумулятора. Окремою проблемою є дестабілізуючий вплив дискретного характеру керуючого сигналу (з частотою близько 10–30 Гц) на швидкодіючі внутрішні контури електропривода (1–10 кГц), що породжує автоколивальні режими.

Таким чином, обґрунтування електромеханічної архітектури системи позиціонування, синтез триконтурної системи автоматичного керування електроприводом у складі бортової оптико-електронної системи БпЛА, вибір оптимального типу електродвигуна та закону керування ним за критеріями енергоефективності, теплового режиму і динамічної точності — це актуальна науково-прикладна задача саме у межах спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка».

Дисертаційна робота Солодчука М.О. спрямована на вирішення цієї задачі шляхом обґрунтування переваг безколекторних двигунів постійного струму як виконавчих механізмів двокоординатної системи позиціонування, удосконалення математичної моделі електропривода у замкненому контурі з триконтурним підпорядкованим регулюванням, а також синтезу закону керування електроприводом, що забезпечує квазіоптимальні (за швидкодією та енергоспоживанням) перехідні процеси в умовах обмежень бортової електроенергетичної системи.

Актуальність обраної тематики підтверджується виконанням дисертаційної роботи у межах держбюджетної НДР «Технічний обрис безпілотних літальних апаратів мультироторного типу з розширеними можливостями» (номер державної реєстрації 0124U001870), за результатами якої розроблено технічні умови ТУ У 30.3-05460798-001:2024 та кодифіковано дослідний зразок БпАК (свідоцтво №220/57/4021 від 31.07.2025). Верифікацію теоретичних розрахунків та результатів експериментальних досліджень електромеханічних процесів здійснено в рамках програми спільних досліджень з Лундським університетом (Швеція).

Оцінка обґрунтованості наукових результатів дисертації, їх достовірності та новизни

Наукові результати дисертації одержані з використанням фундаментальних положень теорії електроприводу, теорії автоматичного керування, методів математичного аналізу, перетворення Лапласа, методів простору станів, теорії силових електроніки та електромеханічного перетворення енергії, методів імітаційного моделювання у середовищі MATLAB/Simulink. Сукупно ці методи відповідають характеру поставлених задач і забезпечують достатньо ефективно їх розв'язання у межах спеціальності 141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка.

Достовірність отриманих результатів підтверджується: коректним застосуванням рівнянь електромеханіки, послідовним виведенням передавальних функцій електропривода як ланки системи керування, узгодженням результатів імітаційного моделювання з аналітичними розрахунками, а також — експериментальною верифікацією на створеному програмно-апаратному комплексі 2DCAM, де віртуальні регулятори у середовищі MATLAB/Simulink безпосередньо керують фізичними виконавчими механізмами через систему зворотного зв'язку (включаючи зчитування реальних значень моменту на валу, температури корпусу та позиції ротора).

Наведеними аргументами підтверджується достовірність наукових результатів, основних положень і висновків дисертаційного дослідження.

Наукова новизна отриманих результатів полягає в наступному:

- Вперше обґрунтовано структуру електромеханічної системи з функціональним поділом каналів виявлення та ідентифікації, що дозволило, на відміну від систем з варіофокальними об'єктивами, які потребують перебудови оптики та виключають масштабування на час перебудови, перейти до конструкції з двома незалежно керованими камерами, де електромеханічна система допоміжної камери здійснює дискретне позиціонування поля зору без впливу на основний (навігаційний) канал, що усуває явище «зон нерозвідки» при масштабуванні.

- Вперше розроблено метод формування дискретних команд позиціонування електропривода, який ґрунтується на аналітичному розрахунку кутових координат із використанням геометричного зонування поля зору навігаційної камери з комплексним урахуванням поточних кінематичних параметрів польоту (висоти, кута нахилу оптичної осі, формату кадру та кута огляду). Це дозволило формалізувати закон цілевказування для електропривода у вигляді дискретних кутових сигналів та забезпечити узгодження частот дискретизації верхнього (від системи технічного зору) та нижнього (від внутрішніх контурів привода) рівнів керування.

- Удосконалено математичну модель електромеханічного приводу позиціонування на базі безколекторного двигуна постійного струму (БДПС), яка, на відміну від відомих, розглядає двигун як астатичний об'єкт керування третього порядку (за кутом повороту вала), враховує електричну та електромеханічну постійні часу, тертя, а також збурення від моменту навантаження. Це дозволило обґрунтувати застосування триконтурної системи підпорядкованого регулювання

(контури струму, швидкості та положення) та забезпечити аперіодичний характер перехідних процесів кута повороту платформи з допоміжною відеокамерою.

– Отримав подальший розвиток закон керування електроприводом на основі методу дискретного ступінчастого позиціонування шляхом зонування зображення навігаційної камери. Доведено, що відмова від безперервного робастного трекінгу дозволяє усунути автоколивальний режим роботи двигуна у фазних обмотках та інверторі, а локалізація активної силової фази у вузькому часовому вікні (1–2 % від періоду керування) забезпечує суттєве зниження електричних втрат у силовому каналі електропривода та нормалізацію теплового режиму електромеханічної системи.

Практична цінність результатів роботи у межах спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка» полягає у наступному:

1. Розроблено та експериментально перевірено прототип двокоординатної системи позиціонування з квазіоптимальним законом керування електроприводом, який є придатним до застосування у складі систем як на основі двигунів постійного струму, так і безколекторних двигунів постійного струму, що забезпечує універсальність інженерного рішення.

2. Розроблено імітаційну модель триконтурної системи керування електроприводом у середовищі MATLAB/Simulink, що може бути застосована як інструмент інженерного проєктування для оцінки динамічних характеристик, синтезу регуляторів та обґрунтованого вибору електромеханічних компонентів бортових систем позиціонування.

3. Створено дослідницький програмно-апаратний комплекс 2DCAM з системою керування із замкненими контурами, який реалізує технологію напівнатурного моделювання (Hardware-in-the-Loop) і дозволяє без розробки проміжних апаратних прототипів верифікувати алгоритми керування електроприводами безпосередньо у єдиному середовищі моделювання.

Матеріали дисертації застосовуються у навчальному процесі Національного університету «Чернігівська політехніка» при викладанні фахових дисциплін за спеціальністю 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка» та 171 «Електроніка».

Результати впроваджено у практичну діяльність ТОВ «БЕЗПІЛОТНІ ТЕХНОЛОГІЇ» та ТОВ «Бойові Птахи України» при розробці електромеханічних систем керування оптичними засобами безпілотних авіаційних комплексів.

Основні наукові результати дисертації коректно представлено у шести пунктах загальних висновків.

Отже, у дисертаційній роботі поставлене наукове завдання виконано повною мірою, здобувач оволодів методологією наукової діяльності у межах спеціальності.

Обґрунтовані у дисертації рішення дають змогу застосувати запропоновані методи синтезу електромеханічних систем позиціонування у нових розробках бортового обладнання БПЛА.

Оцінка змісту дисертації, її завершеність та дотримання принципів академічної доброчесності

За своїм змістом дисертаційна робота здобувача Солодчука М.О. повністю відповідає предметній області спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка». Основний зміст роботи присвячено саме електромеханічним та електротехнічним аспектам — обґрунтуванню типу виконавчого механізму, побудові математичної моделі електропривода, синтезу триконтурної системи автоматичного керування, дослідженню перехідних процесів струму обмотки, кутової швидкості та кута повороту, а також кількісній оцінці енергоефективності та теплового режиму електромеханічної системи. Програмно-алгоритмічні аспекти, пов'язані з системою технічного зору (зокрема, нейромережевий детектор YOLOv4-tiny), розглядаються у роботі допоміжно — як джерело команд цілевказування для електропривода, що цілком відповідає загальній логіці побудови сучасних мехатронних систем.

Дисертаційна робота є завершеною науковою працею, що засвідчує особистий внесок здобувача у науковий напрям «Електромеханічне перетворення та передача енергії».

Розглянувши роботу за результатами перевірки на текстові співпадіння, можна зробити висновок, що дисертаційна робота Солодчука М.О. є самостійною і не містить елементів фальсифікації, компіляції, фабрикації, плагіату та запозичень. Використані ідеї, результати і тексти інших авторів мають належні посилання на відповідне джерело.

Мова та стиль викладення результатів

Дисертаційна робота написана українською мовою.

Матеріали викладено логічно послідовно; застосований стиль написання є науковим, з належним використанням актуальної термінології галузі електромеханіки, теорії електропривода, силовій електроніки та теорії автоматичного керування.

Дисертація складається зі вступу, 4 розділів, висновків, списку використаної літератури зі 148 найменувань та 3 додатків. Загальний обсяг дисертації становить 211 сторінок, у тому числі 190 сторінок основного змісту, робота ілюстрована 68 рисунками та містить 6 таблиць.

У *вступі* представлена актуальність теми дисертаційної роботи, сформульовані мета, об'єкт, предмет, задачі та методи досліджень, визначені наукова новизна, практичне значення отриманих результатів та результати апробації роботи.

У *першому розділі* проаналізовано бортовий інструментарій оптико-електронних систем БПЛА. Виконано порівняльний аналіз існуючих оптико-електронних модулів провідних світових виробників у частині характеристик їхніх електромеханічних систем — гіростабілізованих карданних підвісів, типів виконавчих механізмів та систем зворотного зв'язку. Розглянуто інерціальні навігаційні системи у складі БПЛА як джерело інформації для електромеханічної системи позиціонування. Окремо проаналізовано існуючі методи керування електроприводом гіростабілізованих платформ, виявлено фундаментальні обмеження безперервного трекінгу — явище «чатерінгу» струмів у фазних обмотках та дестабілізуючий вплив транспортного запізнювання відеотракту, що математично формалізовано через аналіз фазового зсуву у замкненому контурі привода.

У *другому розділі* обґрунтовано структуру та методи керування електромеханічною системою позиціонування допоміжної камери БПЛА. Розроблено метод формування дискретних команд позиціонування електропривода на основі геометричного зонування зображення з урахуванням кінематичних параметрів польоту. Обґрунтовано доцільність переходу від безперервного трекінгу до дискретного позиціонування (Point-to-Point) як з точки зору якості перехідних процесів електромеханічної системи, так і з точки зору її енергоефективності. Викладено початкові концептуальні засади побудови електромеханічної системи позиціонування, які у наступному розділі деталізуються до кількісних вимог щодо діапазону кутів, точності та швидкодії.

У третьому розділі розглянуто принципи побудови складових системи позиціонування. Наведено склад бортового радіоелектронного обладнання та електроенергетичної системи БПЛА. Обґрунтовано вибір безколекторного двигуна постійного струму як виконавчого механізму. Виведено передавальні функції електропривода за струмом, швидкістю та кутом повороту. Розроблено триконтурну структуру замкненої системи керування електроприводом з контурами струму, швидкості та положення, налаштовано ПІ- та ПІД-регулятори. Виконано порівняльний аналіз ефективності дискретного позиціонування та безперервного трекінгу за енергетичними і тепловими показниками електромеханічної системи.

У четвертому розділі представлено результати експериментальних досліджень електромеханічної системи позиціонування. Розроблено програмно-апаратний комплекс 2DCAM на базі електромеханічних актуаторів DYNAMIXEL AX-12A та AX-18A на базі двигунів постійного струму. Експериментально досліджено перехідні процеси позиціонування, проведено вимірювання моменту на валу та температури корпусів електроприводів у динамічному та статичному режимах роботи, що дозволило кількісно підтвердити теоретично передбачене зниження теплових втрат при дискретному керуванні.

Загальні висновки висвітлюють одержані наукові результати, а також включають основні рекомендації щодо їх використання. Окремо у висновках сформульовано перспективні напрями подальших досліджень: інтеграція розробленої системи з тепловізійним каналом спостереження для роботи у нічний час, оптимізація алгоритмів нейромережі для розгортання на енергоефективних мікроконтролерах, а також розробка адаптивних регуляторів, які враховують зміну аеродинамічного навантаження на камеру за високих швидкостей польоту.

У додатках до дисертації наведено список публікацій здобувача та відомості про апробацію результатів дисертації, акти використання та впровадження результатів дисертаційної роботи у практичну діяльність ТОВ «БЕЗПЛОТНІ ТЕХНОЛОГІЇ», ТОВ «Бойові Птахи України» та в освітній процес НУ «Чернігівська політехніка», а також приклади використаного програмного забезпечення.

У цілому структура, обсяг та оформлення дисертації відповідають чинним вимогам до дисертацій на здобуття наукового ступеня доктора філософії з галузі знань 14 «Електрична інженерія».

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

Оприлюднення результатів дисертаційної роботи

Наукові результати дисертації відображені у 16 наукових працях, серед яких: 7 наукових праць, в яких опубліковані основні наукові результати дисертації (зокрема, 4 статті у періодичних наукових виданнях, включених до переліку наукових фахових видань України категорії Б, та 3 статті у наукових виданнях, проіндексованих у базі даних Scopus); 4 наукові праці, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації на міжнародних та всеукраїнських науково-технічних конференціях; 5 наукових праць, які додатково відображають наукові результати дисертації.

Результати дисертації були апробовані на 7 науково-технічних конференціях.

Це дає змогу зробити висновок про те, що у науково-технічних виданнях є повна інформація про результати досліджень електромеханічної системи позиціонування.

Науковий рівень публікацій відповідає рівню фахових наукових видань з електричної інженерії та суміжних галузей. В публікаціях здобувач дотримується етики досліджень і правил академічної доброчесності.

Недоліки та зауваження до дисертаційної роботи

1. Експериментальна перевірка теоретичних розрахунків виконана на сервоприводах DYNAMIXEL AX-12A та AX-18A, що базуються на колекторних двигунах постійного струму, тоді як основна частина теоретичних досліджень та імітаційного моделювання (підрозділи 3.3, 3.4.3.2) стосується безколекторних двигунів постійного струму. Зважаючи на принципово різний характер струму у фазних обмотках цих двох типів двигунів — безперервний у ДПС та імпульсний (з вираженою комутаційною складовою) у БДПС, — у роботі бажано було б додатково обґрунтувати, якою мірою отримані експериментальні результати щодо перехідних процесів струму та теплового режиму є релевантними для підтвердження теоретичних моделей саме БДПС-приводів.

2. У підрозділі 3.4.6 наведено кількісні оцінки теплових та енергетичних процесів електромеханічної системи (зниження енерговитрат у 9,6 разів,

зниження кінцевої температури приводів з 79,0 °C до 30,6 °C), однак у роботі відсутня деталізована теплова модель електродвигуна (рівнянь теплопередачі, коефіцієнтів тепловіддачі корпусу, теплоємності міді обмоток, умов охолодження конвекцією), на основі якої отримано зазначені значення. Розкриття використаного підходу до моделювання теплових процесів суттєво підсилило б теоретичну переконливість цих важливих кількісних оцінок.

3. У роботі відсутнє формальне дослідження стійкості розробленої замкненої триконтурної системи керування методами теорії автоматичного керування. Висновки про стабільність системи спираються переважно на результати імітаційного моделювання.

4. У підрозділі 3.3.3 (стор. 120) зазначено, що час позиціонування електропривода не повинен перевищувати тривалість кадру основної відеокамери (10–20 мс), тоді як у підрозділі 3.4.6 при аналізі переваг запропонованого методу припускається час відпрацювання до 1 с для великих переміщень. У роботі бракує чіткого розмежування між поняттями «мікрокорекція положення» (у режимі супроводження) та «значна зміна зони інтересу» (у режимі цілевказування), що породжує невизначеність щодо власне вимог до динаміки електропривода.

5. У підрозділі 3.4.5 у системі рівнянь (3.28)–(3.34) спостерігається непослідовність позначень: у рівнянні (3.28) введено коефіцієнт перетворювача $K_{рс}$, тоді як у наступних рівняннях (3.32), (3.33), (3.34) без відповідного пояснення використано коефіцієнт K_a . Це ускладнює простеження виведення передавальної функції електропривода.

6. Питання вибору силового перетворювача для бортового електропривода у роботі розглянуто поверхово. Зокрема, не наведено результатів моделювання процесів у силових ключах перетворювача (типу комутаційних втрат, вибору частоти ШІМ), хоча у роботі неодноразово зазначається важливість таких параметрів для теплового режиму бортової електроенергетичної системи.

7. В роботі недостатня увага приділена оцінці показників надійності електромеханічної системи.

8. В оформленні дисертації спостерігається деяка непослідовність у використанні термінології: паралельно застосовуються форми «позиціонування» та «позиціювання» (підрозділи 2.3.3, 2.7), а також «двокоординатного» та «двохкоординатного» (стор. 16); у тексті трапляються різні форми родового відмінка слова «апарат» («літального апарата» / «літального апарату»).

Зазначені зауваження не є принциповими і такими, що піддають сумніву вагомі результати досліджень електромеханічної системи позиціонування. Вони не впливають на загальну позитивну оцінку дисертаційної роботи Солодчука М.О.

Висновок про дисертаційну роботу

Вважаю, що дисертаційна робота здобувача ступеня доктора філософії Солодчука Максима Олександровича на тему **«Електромеханічна система двокоординатного позиціонування допоміжної відеокамери безпілотного літального апарата»** 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 «Електрична інженерія», а саме — підвищення енергоефективності та покращення динамічних показників електромеханічної системи позиціонування у складі бортового обладнання БПЛА. 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 Солодчук Максим Олександрович заслуговує на присудження ступеня доктора філософії в галузі знань «Електрична інженерія» за спеціальністю «141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка».

Рецензент:

Проректор з наукової роботи
Національного університету
«Чернігівська політехніка»,

К.Т.Н., доц.



Анатолій ПРИСТУПА