

РЕЦЕНЗІЯ

кандидата технічних наук, старшого дослідника, провідного наукового співробітника Національного університету «Чернігівська політехніка»

Степенка Сергія Анатолійовича

на дисертаційну роботу

Лося Андрія Миколайовича на тему:

«Автономні системи електроживлення комплексів безперервного спостереження на базі безпілотних літальних апаратів»,

подану на здобуття наукового ступеня доктора філософії
за спеціальністю 141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка

Актуальність обраної теми дисертаційного дослідження

У сучасних умовах розвитку автоматизованих технологій спостерігається стійка тенденція до впровадження безпілотних авіаційних платформ у різні сфери людської діяльності. Серед таких технологій особливу увагу привертають комплекси безперервного спостереження на основі безпілотних літальних апаратів (БПЛА або дронів), які завдяки своїй маневреності, гнучкості та адаптивності набули широкого застосування у вирішенні задач збору оперативної інформації в реальному часі.

Перспективним напрямом розвитку подібних систем є організація багатодронових (групових) архітектур, які дозволяють здійснювати широке покриття зони спостереження за рахунок розподілу функціонального навантаження між окремими дронами. Особливої актуальності такі підходи набувають у випадках, коли необхідне забезпечення безперервного спостереження при обмеженому доступі до енергетичних ресурсів, а самі дрони функціонують у напівавтономному або повністю автономному режимі із можливістю автоматичної підзарядки на базових станціях.

Ефективна реалізація таких систем потребує вирішення ряду науково-технічних задач, насамперед пов'язаних із енергетичними обмеженнями як на борту дронів, так і в наземній частині комплексу. Для забезпечення тривалої безперервної роботи зазначених комплексів необхідно враховувати значну кількість взаємопов'язаних чинників, зокрема характеристики акумуляторних батарей, режими польоту, параметри навколишнього середовища, конфігурацію зони покриття, а також алгоритми планування маршрутів і управління енергоспоживанням.

У зв'язку з цим постає актуальне наукове завдання – розвиток підходів до аналізу, моделювання та оптимізації систем електроживлення таких комплексів з урахуванням специфіки їх роботи. Застосування методів системного аналізу, математичного моделювання та експериментальної верифікації дозволяє створити узагальнену наукову базу для проєктування енергоефективних багатодронових систем безперервного спостереження в умовах обмежених ресурсів, що й визначає актуальність обраного напрямку дослідження.

Враховуючи зазначене, тема дисертаційного дослідження Лося А. М., є актуальною і важливою в сучасних умовах.

Оцінка обґрунтованості та достовірності наукових положень, висновків і рекомендацій

Наукові положення, сформульовані в дисертації, мають належне обґрунтування й впливають із послідовного аналізу теоретичних і практичних аспектів функціонування БпЛА у режимах безперервного спостереження. Застосовано комплекс сучасних методів дослідження, зокрема регресійний аналіз, моделювання енергоспоживання, метод експертних оцінок, що забезпечило достовірність отриманих результатів.

Результати верифіковано шляхом натурних експериментів з урахуванням стохастичних факторів, зокрема впливу вітрового навантаження. Висновки дисертації логічно узгоджуються з поставленими завданнями, відповідають темі дослідження та засновані на власних емпіричних даних, що підвищує їх наукову цінність і прикладну придатність.

Структура і зміст дисертаційної роботи

Дисертаційна робота складається зі вступу, п'яти розділів, висновків, списку використаних джерел з 126 найменувань та 4 додатків. Загальний обсяг роботи становить 168 сторінок, в тому числі 137 сторінок основного змісту, 61 рисуноків, 21 таблиць.

У першому розділі дисертації виконано аналіз стану розвитку технологій безперервного спостереження з використанням БпЛА, окреслено ключові технічні виклики та запропоновано концептуальну структуру енергозабезпечення комплексу на основі гібридного використання фотоелектричних джерел, акумуляторних накопичувачів та резервного живлення від мережі. Розроблено модель розміщення дронів відповідно до параметрів оптичних систем, що забезпечує обґрунтоване визначення зони покриття та кількості апаратів. Проведено системний аналіз енергоспоживання бортових підсистем, що дозволило оцінити потенціал автономності комплексу.

Другий розділ присвячено аналізу та вдосконаленню вибору акумуляторних технологій для дронів. Запропоновано двоетапну методику оцінювання за експлуатаційними, технічними та економічними показниками. Застосовано багатокритеріальний підхід, у результаті якого обґрунтовано доцільність використання LiNiMnCoO_2 та LiNiCoAlO_2 батарей у наземній складовій системи. Математичну модель розрахунку ємності батареї адаптовано до впливу температури й тиску, що підвищує точність прогнозування енергетичних характеристик у польоті.

У третьому розділі представлено метод оцінювання енергоспоживання секції комплексу спостереження з групою дронів, що працюють у чергуванні. Побудовано аналітичні моделі місії та визначено оптимальні профілі польоту, які мінімізують витрати енергії. Проведено аналіз кількості необхідних дронів залежно від геометрії зони та параметрів польоту. Досліджено граничні умови ефективності масштабування системи.

У четвертому розділі сформульовано методику визначення параметрів системи електроживлення комплексу, яка враховує конфігурацію зони

спостереження, безперервність роботи, технічні характеристики БпЛА, ККД, а також географічні умови. Визначено залежності номінальної потужності зарядних станцій та ємності акумуляторів від відстані до цільових точок, периметра зони моніторингу та характеристик регіону. Результати представлені у вигляді узагальнених діаграм для типового дрона DJI Mavic 3.

П'ятий розділ присвячено верифікації моделей енергоспоживання шляхом натурних експериментів. Проведено 44 польоти з вимірюванням реальних характеристик: швидкості, часу польоту, струму споживання, вітрових умов. Виконано регресійний аналіз впливу вітру та польотної динаміки на струм навантаження. Уточнено енергетичні моделі та встановлено, що початкові аналітичні оцінки є заниженими. Виявлено нелінійний вплив вітру та можливі напрями подальших досліджень.

Дисертація є добре структурованою, послідовною і завершеною роботою, виконаною автором самостійно. Результати досліджень представлені відповідно до встановлених вимог.

Наукова новизна одержаних результатів

У дисертаційній роботі розв'язано важливу науково-прикладну задачу підвищення енергетичної автономності систем електроживлення комплексів безперервного повітряного спостереження, що базуються на використанні безпілотних літальних апаратів. Для її вирішення розроблено та вдосконалено математичний апарат аналізу енергоспоживання, методи оптимізації архітектури системи енергозабезпечення, а також алгоритми вибору технічних параметрів джерел живлення з урахуванням динамічних умов експлуатації.

На відміну від відомих підходів, запропоновані в роботі методики базуються на цілісному врахуванні специфіки функціонування багатодронових систем спостереження, геометричних та енергетичних обмежень, що обумовлені необхідністю забезпечення безперервного контролю заданої території. Уперше реалізовано інтеграцію аналітичного моделювання польотних місій із параметризацією факторів зовнішнього середовища, що забезпечило можливість переходу від статичних оцінок до варіативного проєктування системи енергоживлення.

Досягнення теоретичних результатів супроводжувалося їхньою експериментальною верифікацією на основі серії натурних польотних випробувань з фіксацією ключових параметрів споживання електроенергії в реальних умовах. Проведений аналіз виявив низку стохастичних впливів, не врахованих у базових моделях, що дало змогу здійснити їхнє уточнення та підвищити достовірність розрахункових оцінок.

Наукова новизна отриманих у дисертації результатів полягає в наступному:

Вперше:

- розроблено концептуальну модель автономної системи електроживлення комплексу безперервного спостереження на базі дронів, для

якої запропоновано діаграму станів та переходів між ними, які описують взаємодію між всіма елементами системи.

- розроблено математичні моделі та методику оцінки енергоспоживання окремої секції системи спостереження, яка дозволяє врахувати енергетичні обмеження, параметри зони спостереження, та визначити оптимальну кількість дронів, необхідних для забезпечення безперервного спостереження.

Удосконалено:

- методику вибору технології акумуляторних батарей на основі комплексного критерію оптимальності, яка на відміну від існуючих є двоетапною та враховує експлуатаційні, технічні та економічні вимоги.

- математичну модель ємності акумуляторних батарей, яка на відміну від існуючих враховує зміну температури та атмосферного тиску на основі технічних даних отриманих від підприємства-виробника.

- методику визначення енергетичних показників системи електроживлення комплексу безперервного спостереження на базі мультикоптерних дронів, яка на відміну від існуючих враховує обмеження, що накладаються параметрами зони та безперервністю процесу спостереження.

Теоретичне та практичне значення результатів дисертаційного дослідження

Науково-практичні розробки та рекомендації автора було впроваджено у практичну діяльність:

- у ТОВ "РЕАКТИВНІ ДРОНИ" шляхом адаптації розробленої методики оцінки енергоспоживання до реальних умов експлуатації, що дозволило оптимізувати енергопостачання та забезпечити стабільну роботу систем без участі персоналу (акт про впровадження ТОВ "РЕАКТИВНІ ДРОНИ");

- у ТОВ "ААА ІНТЕЛЕДЖЕНС" шляхом реалізації інженерних рішень, що підвищили стабільність, ефективність та енергонезалежність автономної системи (акт про впровадження №001-080425 від 08.04.2025).

Повнота викладення наукових результатів дисертації в опублікованих працях

Проведений аналіз наукових публікацій, що висвітлюють результати дисертаційного дослідження, засвідчив їх достатню кількість, повноту представлення основних положень роботи та достовірність авторського внеску. Матеріали дисертації були апробовані на провідних науково-практичних конференціях та обговорені в професійному середовищі.

Усі положення, сформульовані в дисертаційній роботі, є результатом особистої науково-дослідної діяльності здобувача, що підтверджується як характером опублікованих робіт, так і його участю в їх підготовці. Основні результати дослідження оприлюднено у шести наукових публікаціях, серед яких п'ять статей опубліковано в рецензованих фахових виданнях України, включених до переліку категорії «Б», та одна стаття – у міжнародному виданні, індексованому в базі даних Scopus.

Приведені наукові публікації відповідають вимогам п. 8, 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.

Дотримання норм академічної доброчесності

На основі аналізу наданих матеріалів не було виявлено жодного з фактів порушення академічної доброчесності.

Дисертація відповідає нормам і принципам академічної доброчесності та нормам авторського права, порушень цих норм та академічного плагіату не виявлено. Дисертація містить посилання на релевантні джерела, перелічені у списку використаних джерел, а особистий внесок автора в опубліковану роботу підтверджено у співавторстві.

Недоліки та зауваження до дисертаційної роботи

1. Аргументація актуальності обраної тематики дослідження на основі статистики публікацій (рис.1.2, с.19), а також твердження про «різке зростання» кількості публікацій після 2021 року, є не дуже вдалим, враховуючи кількість від 4 до 10 публікацій на рік.
2. Інформація про фактори, що впливають на енергоспоживання дронів (рис.1.21, с.53), по суті є таблицею, і саме в такому вигляді та з кращою якістю її доречно було б представити.
3. В дисертаційній роботі 35 разів зустрічається термін «оптимізація», зокрема, окремі підрозділи мають такі назви: 1.2.4 Оптимізація дальності польоту та кількості дронів для індивідуальних моделей спостереження; 1.3.2 Оптимізація кількості необхідних дронів та вдосконалення алгоритму забезпечення безперервного спостереження; 1.3.3 Оптимізація кількості необхідних дронів для забезпечення безперервного спостереження з енергетичними обмеженнями; 1.3.4 Оптимізація маршрутів польоту з урахуванням енергетичних обмежень; 1.3.6 Оптимізація кількості дронів з урахуванням характеристик цільового навантаження. В той же час, в цих підрозділах не продемонстровано сам процес оптимізації, зокрема, формування та обчислення цільових функцій за відповідних параметрів оптимізації, а лише наведено узагальнену інформацію про «оптимальні» показники.
4. Значення об'ємної щільності енергії (Вт*год/л), рис.2.2, с.66 та значення питомої густини енергії (Вт*год/л), рис.2.3, с.66 потребують пояснень. Зокрема, при однакових одиницях вимірювань, очевидно, малися на увазі різні величини? Одиниці вимірювань не відповідають виразам (2.10) та (2.11) на с.66. Описи позначень АКБ на основі свинцю, нікелю, літію (рис.2.2 та рис.2.3) не відповідають індикаторам на цих гістограмах. АКБ на основі літію одночасно віднесено і до майбутніх технологій?

5. На с.89-90 зазначено, що на рис.3.3 та рис.3.4 наведені результати розрахунку (зміни енергоспоживання дрону залежно від відстані до точки спостереження та максимальна можлива відстань, на якій можливе безперервне спостереження) та результати моделювання (максимальна відстань до точки спостереження для безперервного спостереження залежно від кількості дронів в абсолютних і відносних значеннях) відповідно. В той же час, пояснення на самих рисунках наведені англійською мовою, а посилання на публікацію, де були представлені ці результати, немає.

6. Підрозділ 3.2 с.94 називається «Оцінки режимів роботи системи електроспоживання для оптимізованого профілю польоту». В підрозділі розглядаються можливі профілі польоту, проводиться моделювання споживання енергії на політ та здійснюється вибір оптимального профілю польоту. У зв'язку з цим виникає питання – чи розділяє автор дисертації поняття «оптимізація польоту» та «вибір оптимального польоту», чи вважає ці поняття тотожними?

Наведені зауваження не впливають на загальний позитивний висновок відносно виконаної дисертаційної роботи.

Загальні висновки та оцінка дисертації

Дисертаційна робота Лося Андрія Миколайовича на тему «Автономні системи електроживлення комплексів безперервного спостереження на базі безпілотних літальних апаратів» є структурованою та завершеною роботою, яка має наукову новизну, достовірні результати та практичну цінність.

Дослідження, яке було проведено в рамках дисертаційної роботи відповідає предметній області 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.

Враховуючи вищезазначене, Лось Андрій Миколайович, автор дисертації на тему «Автономні системи електроживлення комплексів безперервного спостереження на базі безпілотних літальних апаратів» заслуговує на присудження ступеня «доктор філософії» за спеціальністю 141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка.

Рецензент:

кандидат технічних наук, старший дослідник,
провідний науковий співробітник Національного
університету «Чернігівська політехніка»

Сергій СТЕПЕНКО