

ВІДГУК**офіційного опонента**

доктора технічних наук, професора, завідувача кафедри автомобільної електроніки

Харківського національного автомобільно-дорожнього університету

Гнатова Андрія Вікторовича

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

Стрімкий розвиток технологій обумовлює постійне удосконалення систем, які можуть забезпечувати ефективний збір даних та моніторинг у різних галузях. Системи на основі безпілотних літальних апаратів (дронів) вирізняються високою мобільністю, гнучкістю та здатністю виконувати завдання у важкодоступних або небезпечних для людини умовах, що зумовлює їхнє широке впровадження. Перспективним напрямом є застосування груп дронів для спостереження за певною ділянкою використовуючи синхронізацію та координацію їх дій. Використання дронів з акумуляторним живленням сприяє створенню автономних систем, де дрони виконують завдання з автоматичним заряджанням на базових станціях. Одним із ключових викликів залишається забезпечення тривалої автономної роботи таких систем в умовах обмежених енергетичних ресурсів, що обумовлює необхідність комплексної оцінки та оптимізації їх енергоспоживання.

Основна наукова проблема полягає у врахуванні впливу багатьох факторів на енергетичні характеристики як повітряної, так і наземної частини системи, серед яких параметри польоту, відстань до точок спостереження, характеристики акумуляторних батарей, зовнішні умови середовища та взаємодія між елементами. Для її розв'язання необхідним є використання методів системного аналізу, математичного моделювання та експериментальної валідації, що дозволяє створювати нові підходи, методики та моделі оптимізації систем електроживлення для безперервної роботи комплексів спостереження.

З огляду на викладене, тематика дослідження, представлена у роботі Лося А. М., є актуальною, науково обґрунтованою та має значний практичний інтерес для розвитку автономних енергетично ефективних безпілотних систем спостереження.

Оцінка обґрунтованості та достовірності наукових положень, висновків і рекомендацій

Структура дисертаційної роботи сформована на основі опрацювання репрезентативного первинного матеріалу, всебічний аналіз і систематизація якого дозволили виокремити ключові наукові положення, зробити обґрунтовані висновки та розробити прикладні рекомендації.

Достовірність та наукова цінність отриманих результатів підтверджується ґрунтовним вивченням наукових праць провідних українських і зарубіжних дослідників, актуальних нормативно-правових документів, звітів міжнародних організацій та аналітичних матеріалів, зібраних із авторитетних інтернет-ресурсів. Такий підхід забезпечив належний рівень об'єктивності при вирішенні завдань дослідження.

Основні висновки, положення та практичні рекомендації спираються на результати власних досліджень здобувача, логічно впливають зі змісту дисертації, мають належне наукове обґрунтування та сформульовані з дотриманням вимог наукової доброчесності.

Для реалізації поставлених наукових завдань у роботі застосовано як загальнонаукові, так і спеціальні методи дослідження, зокрема: методи регресійного аналізу, енергетичного балансу, математичного й комп'ютерного моделювання, а також метод експертних оцінок. Останній використовувався для визначення вагових коефіцієнтів складових при формуванні інтегрального індексу технології акумуляторної батареї в межах розробленої методики її вибору. Регресійний аналіз у поєднанні з натурними експериментами дав змогу врахувати стохастичний вплив зовнішніх факторів (таких як швидкість і напрям вітру) на зміну струму споживання безпілотного літального апарата під час виконання польотного завдання.

Структура і зміст дисертаційної роботи

Дисертація складається із вступу, п'яти розділів, висновків, списку використаних джерел з 126 найменувань та 4 додатків. Загальний обсяг роботи становить 168 сторінок, в тому числі 160 сторінок основного змісту, 61 рисуноків, 21 таблиць.

У першому розділі дисертації здійснено аналіз сучасного стану використання безпілотних літальних апаратів для задач безперервного спостереження. Визначено основні напрями технологічного розвитку в цій сфері, а також окреслено наявні науково-технічні проблеми, що стримують ефективне впровадження таких систем. Сформульовано концептуальну модель енергозабезпечення комплексу безперервного спостереження, яка ґрунтується на переважному використанні відновлюваних джерел енергії (зокрема сонячної) у поєднанні з накопичувачами енергії та можливістю резервного живлення від мережі. Розроблено модель просторового розміщення дронів з урахуванням геометричних параметрів камер, що дозволяє кількісно оцінити необхідну кількість апаратів та забезпечити повне покриття контрольованої території. Проведено детальний аналіз енергоспоживання ключових бортових

систем дронів, що створює підґрунтя для прогнозування тривалості автономної роботи, визначення режимів експлуатації та оцінки ефективності функціонування комплексу за різних зовнішніх умов.

У другому розділі наведено результати дослідження специфіки застосування акумуляторних батарей у системах безперервного спостереження, побудованих на основі мультикоптерних дронів з електричними силовими установками. Удосконалено методику вибору типу акумуляторної батареї шляхом запровадження двоступеневої процедури відбору з урахуванням експлуатаційних, технічних та економічних критеріїв. На основі багатокритеріального аналізу встановлено, що оптимальними для використання у наземній інфраструктурі є батареї на основі літєво-нікелево-марганцево-оксидної та літєво-нікелево-кобальтово-алюмінієво-оксидної хімії. Уточнено математичну модель розрахунку ємності батареї з урахуванням впливу температурних режимів і атмосферного тиску під час польоту, що суттєво підвищує достовірність енергетичних розрахунків для умов реальної експлуатації.

Третій розділ присвячено оцінці енергоспоживання однієї секції комплексу безперервного спостереження, що функціонує на основі групи дронів. Запропоновано нову методику оцінювання енергоспоживання з оптимізацією польотних профілів для визначення мінімальної кількості апаратів, необхідної для забезпечення безперервності спостереження з урахуванням просторових параметрів місії (відстані та висоти польоту). Побудовано математичні моделі, що дозволяють із високою точністю визначати часові й енергетичні характеристики виконання завдань. Встановлено оптимальні траєкторії польоту, які забезпечують мінімальне енергоспоживання. Результати моделювання показали, що для завдань спостереження на відстані до 3084 метрів достатньо трьох дронів типу DJI Mavic 2 Enterprise, а збільшення кількості до шести апаратів дає змогу розширити зону покриття. Водночас подальше нарощування кількості дронів призводить до зниження енергетичної ефективності комплексу.

У четвертому розділі представлено розробку методики визначення параметрів енергозабезпечення системи безперервного моніторингу на основі мультикоптерних дронів з урахуванням конфігурації периметра зони спостереження та вимоги безперервності процесу. Запропонований підхід дозволяє на основі параметрів дронів, коефіцієнтів корисної дії енергетичних перетворювачів, мінімального часу автономної роботи та просторових координат обчислювати вимоги до систем накопичення енергії та необхідну потужність фотоелектричних систем. На основі проведених розрахунків визначено залежності між відстанню до зони спостереження та номінальною потужністю зарядної інфраструктури, а також мінімально необхідну ємність акумуляторних батарей для забезпечення автономної роботи комплексу протягом 24 годин. Зокрема, для дрона класу DJI встановлено, що потужність зарядних станцій варіюється в межах 454–1724 Вт, а ємність батарей — у діапазоні від 793 до 20162 А·год. Орієнтовна кількість необхідних сонячних

панелей для умов Київської області становить від 75 до 1906 одиниць залежно від розмірів периметра спостереження.

У п'ятому розділі подано результати експериментальних досліджень впливу зовнішніх факторів на енергоспоживання дронів під час польоту, що дало змогу уточнити математичні моделі енергоспоживання в системах безперервного моніторингу. У ході 44 експериментальних польотів виконано вимірювання вертикальної та горизонтальної швидкості, часу в повітрі, залишкового заряду батареї та параметрів вітру. Проведено регресійний аналіз робочого струму навантаження з урахуванням реальних параметрів польоту, що дало змогу суттєво скоригувати розрахунки мінімальної кількості дронів, необхідної для безперервного покриття, залежно від умов місцевості та висоти польоту. Уточнені моделі засвідчили, що реальне енергоспоживання перевищує аналітичні оцінки, що зумовлює зменшення дальності ефективного спостереження та необхідність збільшення кількості апаратів. Установлено нелінійний вплив швидкості та напрямку вітру на енергоспоживання дрона. Також виявлено додаткові, поки що неідентифіковані чинники, що впливають на споживання енергії, що відкриває перспективи для подальших досліджень. При цьому зниження температури повітря не мало суттєвого впливу на ефективну ємність акумулятора завдяки конструктивним особливостям дронів і наявності ефекту саморозігріву.

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 вирішено актуальне наукове завдання – забезпечення енергетичної автономності систем електроживлення комплексів безперервного спостереження на базі безпілотних літальних апаратів шляхом розвитку методів аналізу та створення математичних моделей як окремих компонентів, так і системи електроживлення в цілому.

На відміну від існуючих підходів, запропоновані в роботі моделі та методи враховують специфіку комплексів безперервного спостереження з використанням дронів, а також обмеження, пов'язані з геометричними характеристиками зони спостереження та необхідністю забезпечення безперервності функціонування системи.

Розроблені математичні моделі охоплюють такі аспекти, як енергоспоживання бортових систем дронів, оптимізація кількості апаратів залежно від параметрів польотів і характеристик зон спостереження, вибір акумуляторних технологій з урахуванням експлуатаційних умов, а також параметри наземних систем накопичення та генерування енергії, зокрема фотоелектричних станцій.

Адекватність теоретичних рішень підтверджено результатами натурних експериментів із застосуванням мультикоптерних БпЛА. Проведені випробування дали змогу не лише якісно верифікувати розроблені моделі, але й

кількісно уточнити вплив зовнішніх стохастичних чинників, які не були враховані на етапі аналітичного моделювання.

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

Аналіз кількості наукових публікацій, повноти опублікування результатів дисертації та особистого внеску здобувача до всіх наукових публікацій, опублікованих самостійно й у співавторстві та зараховані за темою дисертації, засвідчив, що результати дослідження, викладені у дисертаційній роботі,

отримані автором самостійно та повною мірою відображені в публікаціях, доповідалися та обговорювалися на науково-практичних конференціях.

Основні результати дисертаційного дослідження опубліковані здобувачем самостійно та в співавторстві в 6 наукових працях, серед яких 5 статей у наукових періодичних фахових виданнях України категорії «Б» та 1 закордонна публікація, яка включена до міжнародної наукометричної бази 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. В роботі наводяться оцінки кількості фотоелектричних панелей, яка необхідна для забезпечення автономності роботи комплексу спостереження (розділ 4 – табл. 4.4, рис. 4.8, 4.9). Використання як кінцевої величини “кількість панелей” вбачається необґрунтованим, оскільки сама кількість є залежною від ефективності перетворення випромінювання у електричну енергію у фотоелектричному перетворювачі, його номінальної потужності тощо. В той же час, як початкові дані для розрахунку в роботі використовувалися параметри “Площа однієї фотоелектричної панелі” - 1,6 м² та “Ефективність фотоелектричного перетворення ФЕС” - 15,5% (табл. 4.1), які, однак, наведені без прив’язки до існуючих моделей ФЕП. Більшість з промислових сучасних зразків мають номінальну потужність 430-450 Вт, ефективність перетворення випромінювання біля 21%, та площу біля 2 м².

2. В роботі не прийнято до уваги зміну ефективності перетворення сонячного випромінювання у електричну енергію залежно від температури поверхні фотоелектричного перетворювача, що впливатиме на ефективність роботи автономної системи електроживлення комплексу влітку та взимку.

3. В роботі запропоновано структуру (концептуальну модель) системи електрозабезпечення комплексів спостереження на основі безпілотних літальних апаратів, її діаграму станів та переходів між ними, які описують взаємодію між всіма елементами системи. Однак, недостатня увага приділена

деталю, зокрема, електричним параметрам – напрузі ланки постійного струму, номінальній напрузі акумуляторних батарей, фотоелектричної системи, зарядних станцій. Ці рівні визначатимуть тип перетворювачів постійного струму (підвищуючий, понижуючий, підвищуючо-понижуючий тощо), а відповідно і їх ефективність.

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

Загальні висновки та оцінка дисертації

Підсумовуючи раніше наведені твердження можна стверджувати що дисертаційна робота на тему «Автономні системи електроживлення комплексів безперервного спостереження на базі безпілотних літальних апаратів» 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.

Враховуючи вищезазначене можна зробити однозначний висновок що 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.

Офіційний опонент:

доктор технічних наук, професор,
завідувач кафедри автомобільної електроніки Харківського
національного автомобільно-дорожнього університету



Андрій ГНАТОВ

*Підпис Гнатова Андрія Миколайовича
засвідчую, проректор*



Михайло Митасов