

## **ВІДГУК**

### **офіційного опонента**

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**

Системи на основі безпілотних літальних апаратів є одним із нових напрямів сучасного розвитку технологій завдяки їх мобільності, гнучкості та здатності виконувати завдання у важкодоступних або небезпечних для людини умовах.

Групово скоординована робота дронів для виконання завдань моніторингу та спостереження дозволяє масштабувати зони інтересу шляхом розподілу завдань та синхронізації роботи окремих елементів системи. Застосування мультикоптерних дронів, рушії яких приводяться в дію електричними двигунами з живленням від акумуляторних батарей, дозволяє застосовувати такі дрони у складі автономних систем, у яких дрони підзаряджаються в автоматичному режимі на базовій станції комплексу спостереження. Однак труднощі викликає забезпечення тривалої експлуатації мультикоптерних дронів при обмежених енергетичних ресурсах. Тому, задача підвищення енергетичної ефективності автономних систем електроживлення комплексів безперервного спостереження на базі безпілотних літальних апаратів та їх складових є актуальною.

### **Оцінка обґрунтованості та достовірності наукових положень, висновків і рекомендацій**

Обґрунтованість та достовірність отриманих результатів підтверджується коректністю основних припущень і положень, покладених в основу наукових досліджень. Всі наукові результати та положення, які містяться в дисертаційній роботі, достатньо науково обґрунтовані, а отримані висновки і наведені рекомендації носять практичний характер та достовірні. Обґрунтованість досліджень, сформульованих у дисертаційній роботі висновків і рекомендацій, обумовлюється обраними методами досліджень: використанням системного аналізу, математичного та комп'ютерного моделювання, регресійного аналізу, експериментальних досліджень та натурних експериментів.

Наукові положення, висновки та рекомендації підтверджуються публікаціями у фахових виданнях та апробацією їх на наукових конференціях.

### **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 рисунок, 21 таблиця.



У першому розділі проведено огляд сучасного стану комплексів спостереження на базі безпілотних літальних апаратів (БпЛА) та перспективи подальшого розвитку та вдосконалення. Запропоновано модель енергозабезпечення таких систем, яка передбачає максимальне використання сонячної енергії та накопичувачів з можливістю підключення до мережі при потребі. Розглянуто модель розміщення дронів з урахуванням характеристик їх камер, що дає змогу визначити необхідну кількість апаратів і площу покриття. Крім того, проаналізовано енергоспоживання основних систем дронів, що дозволяє прогнозувати режими роботи, автономність та реальні можливості спостереження для забезпечення ефективної роботи комплексу в різних умовах.

Другий розділ дисертації присвячений дослідженню особливостей застосування акумуляторних батарей у системах безперервного спостереження на основі БпЛА. Описано вдосконалену методику вибору технології акумуляторних батарей шляхом введення двоетапного відбору за експлуатаційними, технічними та економічними показниками. На основі багатокритеріального аналізу визначено, що для використання у наземній складовій найкращими є батареї літієво-нікелево-марганцево-оксидної та літієво-нікелево-кобальтово-алюмінієво-оксидної технологій. Наведено удосконалену математичну модель розрахунку ємності батарей, яка враховує вплив температури й атмосферного тиску під час польоту, що підвищує точність оцінки енергетичних можливостей дронів у реальних умовах експлуатації.

У третьому розділі проведено оцінку електроспоживання БпЛА у складі комплексу спостереження. Розроблено методику оцінки енергоспоживання та оптимізації польотних профілів для визначення мінімальної кількості дронів, необхідної для безперервного спостереження, з урахуванням відстані та висоти польоту. Створено математичні моделі, які дозволяють розраховувати часові та енергетичні показники виконання місії. Встановлено оптимальний профіль польоту, що забезпечує мінімальне енергоспоживання. Теоретичні викладки підтверджені моделюванням, яке показало, що для завдань на відстані до 3084 м достатньо трьох дронів, збільшення кількості дронів до шести дозволяє розширити зону спостереження, проте подальше збільшення кількості стає неефективним через енергетичні обмеження.

Четвертий розділ присвячений розробці методики визначення енергетичних параметрів системи електроживлення комплексу спостереження на базі мультикоптерних дронів. Запропонована методика дозволяє на основі технічних характеристик дронів, ККД перетворювачів, мінімального часу автономної роботи та координат розміщення розрахувати параметри систем накопичення енергії й необхідну потужність фотоелектричних перетворювачів. З використанням описаної методики визначено залежність номінальної потужності зарядних станцій від відстані до точки спостереження, мінімально необхідну ємність акумуляторних батарей для забезпечення автономної роботи комплексу протягом 24 годин, а також мінімальну потужність фотоелектричних панелей залежно від периметра зони спостереження та регіону розташування.



У п'ятому розділі з метою вдосконалення моделей енергоспоживання для систем безперервного спостереження проведено експериментальну оцінку впливу зовнішніх факторів на енергоспоживання дрона під час польоту. Здійснено регресійний аналіз робочого струму навантаження дрона з урахуванням реальних параметрів польоту, що дозволило суттєво уточнити розрахунки кількості дронів для безперервного спостереження залежно від умов місцевості та висоти польоту. Уточнені моделі показали, що реальні значення енергоспоживання вищі за попередні аналітичні оцінки, що призводить до збільшення мінімальної необхідної кількості дронів та зменшення максимальної відстані спостереження. Встановлено істотний нелінійний вплив швидкості та напрямку вітру на споживання енергії дроном, а також виявлено потенціал для подальших досліджень через наявність неідентифікованих чинників впливу. Дослідження показали, що зниження температури не мало суттєвого впливу на ємність акумулятора завдяки саморозігріву та конструктивним особливостям дронів.

### **Наукова новизна одержаних результатів**

Офіційний опонент погоджується з основними положеннями наукової новизни представленої дисертації.

1. 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.

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

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

4. Вперше 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.

5. Вдосконалено методику визначення енергетичних параметрів 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**

В дисертаційній роботі вирішене актуальне наукове завдання забезпечення енергетичної автономності систем електроживлення комплексів безперервного спостереження на базі безпілотних літальних апаратів шляхом



розвитку методів аналізу та розробки математичних моделей як окремих складових, так і системи електроживлення такого комплексу в цілому. На відміну від існуючих, запропоновані моделі та методи враховують особливості комплексів безперервного спостереження на базі безпілотних літальних апаратів, та обмеження, які накладаються параметрами зони спостереження та вимогою забезпечення безперервного спостереження. Запропоновані моделі були перевірені шляхом проведення натурних експериментів з безпілотним літальним апаратом, що дозволило якісно підтвердити отримані теоретичні результати, та уточнити кількісно вплив неврахованих у теоретичних моделях зовнішніх стохастичних параметрів.

Результати досліджень можуть бути використані для проєктування автономних систем електроживлення комплексів безперервного спостереження на базі безпілотних літальних апаратів, які будуть оптимальними за енергетичними параметрами для застосування у сферах безпеки, екологічного моніторингу та інфраструктурного контролю.

Розроблені методики дозволяють оптимізувати використання ресурсів акумуляторів дронів, що знижує витрати на експлуатацію таких систем. Розроблені математичні моделі можуть бути впроваджені у програмне забезпечення для управління групами дронів з метою забезпечення ними функцій безперервного моніторингу визначеного периметра.

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

Наукові результати дисертації висвітлені у 6 наукових публікаціях здобувача, серед яких: 5 статей у наукових періодичних виданнях, включених на дату опублікування до переліку наукових фахових видань України (категорія «Б») та та 1 публікація, яка включена до міжнародної наукометричної бази Scopus (з присвоєним ISSN).

Також результати дисертації були апробовані на 6 науково-технічних конференціях.

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.

#### **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. У розділі 1 не поставлено задачу дисертаційного дослідження.
2. З тексту дисертації не зрозуміло, чому для порівняння відібраних технологій акумуляторних батарей використовується саме метод Сааті. Чи проводилось порівняння з іншими методами аналізу ієрархії?
3. У розділі 3.1 описана модель батареї дрона у середовищі MATLAB, проте сама модель та результати її моделювання відсутні.
4. Аналогічно у розділі 4 декілька разів згадуються різні моделі в середовищі MATLAB, проте самі моделі не наведені, а лише результати їх роботи.
5. На деяких рисунках, наприклад рис. 3.2, присутні англомовні написи.
6. У роботі присутні незначні орфографічні помилки.

Вважаю, що висловлені зауваження не є визначальними і не зменшують загальну наукову новизну та практичну значимість результатів та не впливають на позитивну оцінку дисертаційної роботи.

### Загальні висновки та оцінка дисертації

Представлена дисертація Лося Андрія Миколайовича «Автономні системи електроживлення комплексів безперервного спостереження на базі безпілотних літальних апаратів» 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 вирішують актуальну науково-прикладну проблему підвищення енергетичної ефективності автономних систем електроживлення комплексів безперервного спостереження на базі безпілотних літальних апаратів та їх складових.

Дисертаційна робота Лося А.М. за змістом, одержаними науковими результатами та їх практичним впровадженням 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., а її автор – Лось Андрій Миколайович – заслуговує присудження наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка.

### Офіційний опонент:

доцент кафедри електронних пристроїв та систем  
Національного технічного університету України  
«Київський політехнічний інститут  
імені Ігоря Сікорського»  
кандидат технічних наук, доцент

