

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

НАЦІОНАЛЬНИЙ АВІАЦІЙНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Факультет аеронавігації, електроніки та телекомунікацій

Кафедра аеронавігаційних систем

ДОПУСТИТИ ДО ЗАХИСТУ

Завідувач кафедри АНС

д-р техн. наук, проф.

\_\_\_\_\_ В.Ю. Ларін

« \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2023р.

## **ДИПЛОМНА РОБОТА**

**(ПОЯСНЮВАЛЬНА ЗАПИСКА)**

**ВИПУСКНИКА ОСВІТНЬОГО СТУПЕНЯ «МАГІСТР»**

за освітньо-професійною програмою

**«СИСТЕМИ АЕРОНАВІГАЦІЙНОГО ОБСЛУГОВУВАННЯ»**

**Тема: «Методика оцінки енергоефективності коптерних  
схем БпЛА»**

Виконавець:

Павлюк Данило Любомирович

Керівник:

Харченко Володимр Петрович

Нормоконтролер:

Шмельова Тетяна Федорівна

Київ-2023

# НАЦІОНАЛЬНИЙ АВІАЦІЙНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Факультет аеронавігації, електроніки та телекомунікацій

Кафедра аеронавігаційних систем

Спеціальність: 272 «Авіаційний транспорт»

Освітньо-професійна програма: «Безпілотні авіаційні комплекси»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри АНС

\_\_\_\_\_ В.Ю. Ларін

«\_\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2023 р.

## ЗАВДАННЯ

**на виконання дипломної роботи**

**Павлюка Данила Любомировича**

- Тема дипломної роботи:* «**Методика оцінки енергоефективності коптерних схем БпЛА**» затверджена наказом ректора від "22" серпня 2023 р. № 1443/ст.
- Термін виконання роботи:* з 23.10.2023 по 31.12.2023.
- Вихідні дані до роботи:* дані, отримані шляхом експериментів, тестів різних гвинтів, двигунів на стендах та багатороторних БпЛА.
- Зміст пояснювальної записки:* Теоретичний огляд; Методика оцінки енергоефективності коптерних схем БпЛА; Підбір гвинтомоторної групи; Експериментальні дослідження.
- Перелік обов'язкового графічного (ілюстративного) матеріалу:* 30 рисунків, 6 таблиць, 2 формули.

6. Календарний план-графік

№ пор.	Завдання	Термін виконання	Відмітка про виконання
1.	Розробити та оформити 1 розділ «Теоретичний огляд »	08.09.2023 - 16.09.2023	Виконано
2.	Розробити та оформити 2 розділ «Методика оцінки енергоефективності коптерних схем БПЛА»	08.09.2023 - 23.09.2023	Виконано
3.	Розробити та оформити 3 розділ «Підбір гвинтомоторної групи»	08.09.2023 - 26.09.2023	Виконано
4.	Розробити та оформити 4 розділ «Експериментальні дослідження»	08.09.2023 - 29.09.2023	Виконано
5.	Розробити та оформити 5 розділ «Загальні висновки »	08.09.2023- 29.09.2023	Виконано

7. Дата видачі завдання: 23 жовтня 2023 року.

Керівник дипломної роботи: Харченко Володимр Петрович

Завдання прийняв до виконання: Павлюк Данило Любомирович

## РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка до дипломної роботи «Методика оцінки енергоефективності коптерних схем БПЛА»: 78 сторінок, 30 рисунків, 6 таблиць, 2 формули, 19 використаних джерел.

**Об'єкт дослідження** – коптерні схеми безпілотних літальних апаратів (БПЛА).

**Предмет дослідження** – методика оцінки енергоефективності коптерних схем безпілотних літальних апаратів (БПЛА) і підбір гвинтомоторної групи.

**Мета дипломної роботи** – розробка методики оцінки енергоефективності коптерних схем БПЛА для подальшого ефективного їх використання та підбору гвинтомоторної групи.

**Методи дослідження** – експериментальні вимірювання, статистичний аналіз, теоретичні методи, методи математичного та комп'ютерного моделювання, математичні обчислення.

**Актуальність** – дослідження енергоефективності коптерних схем БПЛА вкрай актуально в сучасному світі, де використання безпілотних літальних апаратів постійно поширюється в цивільних і військових сферах. Забезпечення високої ефективності польоту є ключовим аспектом для підвищення продуктивності та зниження витрат енергії. Розробка методики оцінки енергоефективності та вивчення взаємозв'язку параметрів коптерних схем дозволить оптимізувати їхню конфігурацію, підвищити тривалість польоту та розширити області застосування. Це дослідження є важливим кроком у розвитку безпілотних технологій, сприяючи створенню більш стійких, продуктивних та енергоефективних систем.

Результат дипломної роботи рекомендовано використовувати під час проведення наукових досліджень та в практичній діяльності оцінки енергоефективності коптерних схем БПЛА.

КОПТЕРНІ СХЕМИ БПЛА, ПІДБІР ГВИНТОМОТОРНОЇ ГРУПИ,  
ЕНЕРГОЕФЕКТИВНІСТЬ, СТАТИСТИЧНІ ДАНІ, ГРАФІКИ ЗАЛЕЖНОСТІ ТЯГИ ВІД  
СПОЖИВАНОЇ ПОТУЖНОСТІ

# АРКУШ ЗАУВАЖЕНЬ

## ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ ТА СКОРОЧЕНЬ.....	2
ВСТУП.....	3
<b>РОЗДІЛ 1.....</b>	<b>5</b>
<b>ТЕОРЕТИЧНИЙ ОГЛЯД.....</b>	<b>5</b>
1.1 Огляд літератури та попередніх досліджень щодо енергоефективності коптерних схем БпЛА.....	5
1.2 Опис теоретичних основ та концепцій, що використовуються у дослідженні.....	19
Висновок до розділу 1 .....	24
<b>РОЗДІЛ 2.....</b>	<b>26</b>
<b>МЕТОДИКА ОЦІНКИ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ КОПТЕРНИХ СХЕМ БПЛА.....</b>	<b>26</b>
2.1 Опис розробленої методики.....	26
2.2 Пояснення використовуваних параметрів та критеріїв оцінки .....	29
2.3 Процедури вимірювань та аналізу даних .....	34
Висновок до розділу 2 .....	42
<b>РОЗДІЛ 3.....</b>	<b>43</b>
<b>ПІДБІР ГВИНТОМОТОРНОЇ ГРУПИ .....</b>	<b>43</b>
3.1 Аналіз варіантів гвинтомоторних систем.....	43
3.2 Критерії та методика вибору оптимальної гвинтомоторної групи .....	43
3.3 Порівняння та оцінка різних конфігурацій гвинтомоторів.....	44
Висновок до розділу 3 .....	50
<b>РОЗДІЛ 4.....</b>	<b>51</b>
<b>ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ.....</b>	<b>51</b>
4.1 Опис методики проведення експерименту.....	51
4.2 Вимірювання параметрів та збір даних .....	60
4.3 Аналіз отриманих результатів .....	61
Висновок до розділу 4 .....	67
<b>ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ .....</b>	<b>68</b>
Резюме проведених досліджень .....	68
Висновки щодо досягнених результатів.....	69
Рекомендації для подальших досліджень.....	70
<b>СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ.....</b>	<b>71</b>

## ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ ТА СКОРОЧЕНЬ

**БпЛА** – Безпілотний літальний апарат

**БпАК** – Безпілотний авіаційний комплекс

**ЕЕ** – Енергоефективність

**ГМГ** – Гвинтомоторна група

**Рез.** – Результат

**Стат.** – Статистичний

**АТС** – AirTrafficControl

**АТМ** – Air Traffic Management

**АТС** – Air Traffic Service

**DM** – Decision-Making

**EUROCONTROL** – The European Organisation for the Safety of Air Navigation

**ICAO** – International Civil Aviation Organization (міжнародна організація цивільної авіації)

## ВСТУП

У сучасному світі безпілотні літальні апарати (БпЛА) стають не лише предметом технічного захоплення, але й ключовим елементом в різних галузях, включаючи військову, комерційну, аграрну та дослідницьку сфери. Їхнє використання розширюється, забезпечуючи величезний потенціал для ефективних та унікальних можливостей. Проте, серед основних технічних викликів, що стоять перед розробниками та користувачами, особливою є проблема енергоефективності.

Енергоефективність БпЛА набуває великого значення у забезпеченні продуктивності, тривалості польоту та стабільності роботи. Оптимальне використання енергії є вирішальним аспектом для подовження часу польоту БпЛА, зменшення залежності від енергетичних джерел та забезпечення ефективної роботи системи.

Метою цієї дипломної роботи є розробка методики оцінки енергоефективності коптерних схем БпЛА та підбір гвинтомоторної групи для подальшого ефективного їх використання. Для досягнення цієї мети передбачено ретельний аналіз літератури та попередніх досліджень з питань енергоефективності коптерів, розробку методики, визначення параметрів та критеріїв оцінки, а також проведення експериментів для верифікації розробленої методики та вибору оптимальної гвинтомоторної групи.

Огляд літератури включає вивчення попередніх досліджень щодо енергоефективності коптерних схем та вибору гвинтомоторної групи. Також розглядаються теоретичні основи та концепції, використовувані у дослідженні, що надає основу для подальшого аналізу.

У другому розділі буде розглянута розроблена методика, включаючи опис параметрів коптерних схем, критеріїв оцінки та процедур вимірювань та аналізу даних. Це надасть основу для систематичного оцінювання енергоефективності.

У третьому розділі буде проведено аналіз різних варіантів гвинтомоторних систем, визначено критерії та методику вибору оптимальної гвинтомоторної групи, а також здійснено порівняння різних конфігурацій гвинтомоторів.



Четвертий розділ буде присвячений опису методики проведення експерименту, вимірюванню параметрів та збору даних, а також аналізу отриманих результатів.

Ця робота не лише має теоретичне значення, допомагаючи в розумінні основ енергоефективності коптерів, але й має безпосереднє практичне застосування, сприяючи подальшому розвитку безпілотної авіації та підвищенню її ефективності.

Враховуючи постійний розвиток цієї галузі, отримані результати можуть бути використані для удосконалення та оптимізації систем БПЛА у різних галузях, що вимагають автономних літальних апаратів.

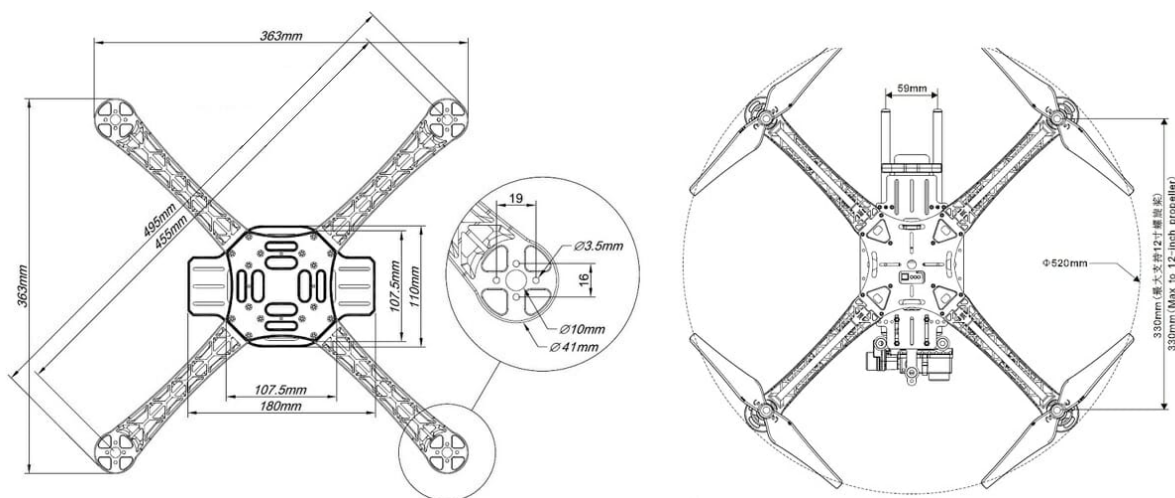
Дослідження енергоефективності коптерних схем БПЛА вкрай актуально в сучасному світі, де використання безпілотних літальних апаратів (БПЛА) постійно розширюється в цивільних і військових сферах. Забезпечення високої ефективності польоту є ключовим аспектом для підвищення продуктивності та зниження витрат енергії. Розробка методики оцінки енергоефективності та вивчення взаємозв'язку параметрів коптерних схем дозволить оптимізувати їхню конфігурацію, підвищити тривалість польоту та розширити області застосування. Це дослідження є важливим кроком у розвитку безпілотних технологій, сприяючи створенню більш стійких, продуктивних та енергоефективних систем.

## РОЗДІЛ 1. ТЕОРЕТИЧНИЙ ОГЛЯД

### 1.1 Огляд літератури та попередніх досліджень щодо енергоефективності коптерних схем БПЛА

Безпілотний літальний апарат (БПЛА), також відомий "дрон", є літальним апаратом без екіпажу на борту, призначеним для здійснення повітряних зйомок, спостереження та виконання різних завдань у реальному часі або згідно з попередньо визначеною місією. БПЛА зарекомендували себе як важливий елемент як у військовій, так і в цивільній сферах. Вони використовуються не лише для військових цілей, але й у наукових, комерційних та громадських сферах. Залежно від потреб користувачів, було розроблено різні типи БПЛА, кожен з яких має унікальні характеристики та спеціалізації. Ось деякі з найбільш поширених типів БПЛА:

1. Мультироторні БПЛА: це найпоширеніший тип, який часто використовується для фотографування, відеозйомки та інших комерційних цілей. Вони мають кілька роторів (наприклад, квадрокоптери з чотирма роторами), що забезпечує їм стабільність та маневреність (див. рис. 1.1.1):



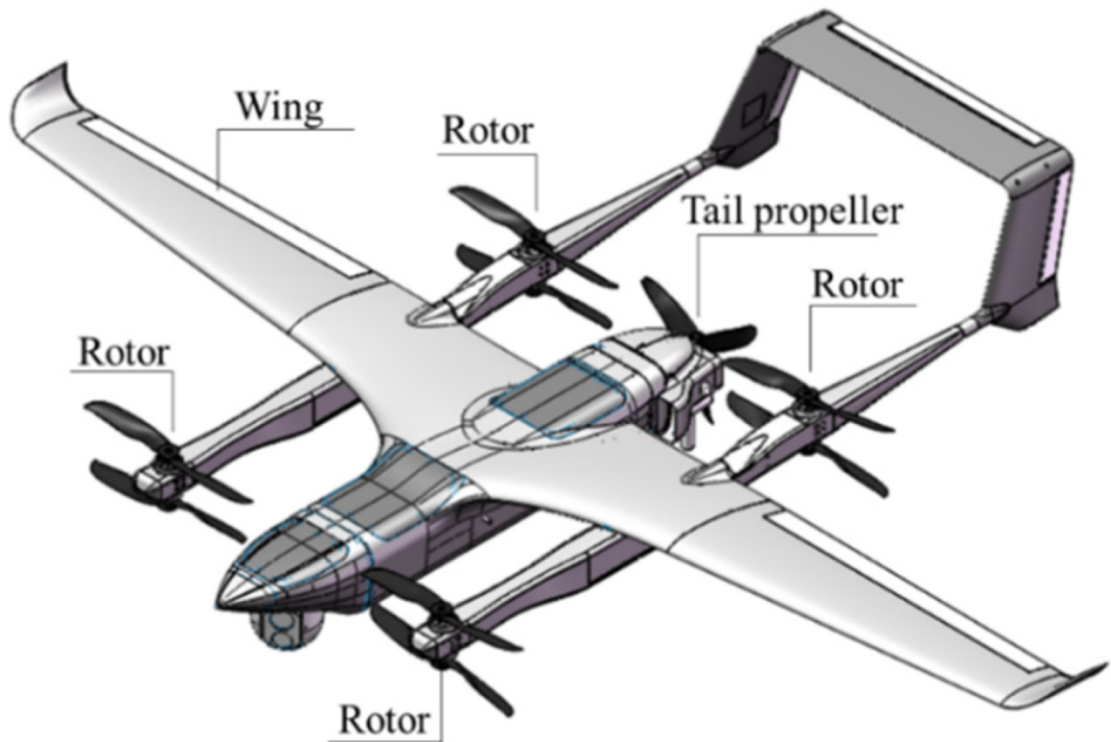
*Рис. 1.1.1 Схематичне зображення квадрокоптера та його рами*

2. Фіксовані крила: ці БПЛА схожі на традиційні літаки і можуть літати на більші відстані та вищі висоти. Вони ідеально підходять для маппінгу, аграрного моніторингу, та розвідки (див. рис. 1.1.2):



*Рис. 1.1.2 Зображення фіксованого крила*

3. Гібридні БПЛА: це комбінація мультироторних та фіксованих крил, що дозволяє їм злітати і приземлятися вертикально, а також літати на дальні відстані. Вони застосовуються в доставці, моніторингу та пошуково-рятувальних операціях (див. рис. 1.1.3):



*Рис. 1.1.3 Зображення гібридного БпЛА (VTOL)*

4. Мініатюрні та нано БпЛА: ці маленькі БпЛА часто використовуються в наукових та військових дослідженнях для збору даних у важкодоступних місцях. (див. рис. 1.1.4):



*Рис. 1.1.4 Зображення нано БпЛА Black Hornet*

5. Військові БпЛА: розроблені для розвідки, нагляду та, в деяких випадках, для ведення вогню. Вони можуть бути великими та технологічно складними, здатні до тривалих польотів (див. рис. 1.1.5):



*Рис. 1.1.5 Зображення військового БпЛА компанії General Atomics*

6. Гоночні БпЛА: спеціально розроблені для швидкості та маневреності, використовуються у спортивних змаганнях (див. рис. 1.1.6):



*Рис. 1.1.6 Зображення гоночного FPV дрону DRLRACER 4*

7. Аграрні БПЛА: використовуються для сільськогосподарських застосувань, таких як розпилення пестицидів, моніторинг врожаю та аналіз земель. Приклад розпилення зображено на рис. 1.1.7:



*Рис. 1.1.7 Зображення агродрону, який розпилює пестициди.*

8. Комерційно-транспортні БПЛА: розроблені для доставки товарів, вони можуть змінити майбутнє логістики та експрес-доставки (див. рис. 1.1.8):



*Рис. 1.1.8 Зображення БпЛА KARGO призначеного для поповнення невеликих підрозділів морської піхоти, розкиданих по різних віддалених островах.*

Кожен тип БпЛА розроблений, щоб виконувати певні завдання та задовольняти конкретні потреби, від військових та наукових досліджень до комерційного використання та розваг.

Також ці типи поділяються на класи. Нижче наведена класифікація згідно з українським законодавством, а саме відповідно до Додатку 1 до Правил виконання польотів безпілотними авіаційними комплексами державної авіації України [1]:

«1. За класами БпЛА БпАК класифікуються як:

1) I клас "Легкі" (злітною масою до 150 кг), до якого належать:

- мікро (тактичні) БпЛА БпАК, що мають злітну масу менше 2 кг, радіус дії до 5 км;
- міні (тактичні поля бою) БпЛА БпАК, що мають злітну масу від 2 до 15 кг, радіус дії більше 5 км;
- малі (тактичні) БпЛА БпАК, що мають злітну масу більше 15 кг, радіус дії більше 25 км. БпЛА I класу запускаються з руки, за допомогою катапульти, мобільних пускових пристроїв або використовують ЗПС (ЗПМ);

2) II клас "Середні" (злітною масою від 150 до 600 кг), до якого належать тактичні (оперативно-тактичні) БпЛА БпАК з радіусом дії більше 50 км. БпЛА II класу запускаються за допомогою катапульти, мобільних пускових пристроїв або використовують ЗПС (ЗПМ);

3) III клас "Важкі" (злітною масою більше 600 кг), до якого належать:

- оперативні БпЛА БпАК (medium altitude long endurance - MALE, середньої висоти, довгої тривалості), що застосовуються на висоті до 13700 м (45000 футів) та мають радіус дії більше 200 км;
- стратегічні БпЛА БпАК (high altitude long endurance - HALE, великої висоти, довгої тривалості), що застосовуються на висоті до 19800 м (65000 футів) та мають радіус дії більше 200 км. БпЛА III класу потребують ЗПМ зі штучним покриттям».

Також більш детально про класифікацію БпЛА розписали О.І. Тимочко, Д.Ю. Голубничий, В.Ф. Третьяк та І.В. Рубан. Вони наводять схему «Класифікація БпЛА за призначенням» (див. рис. 1.1.9) [2]:



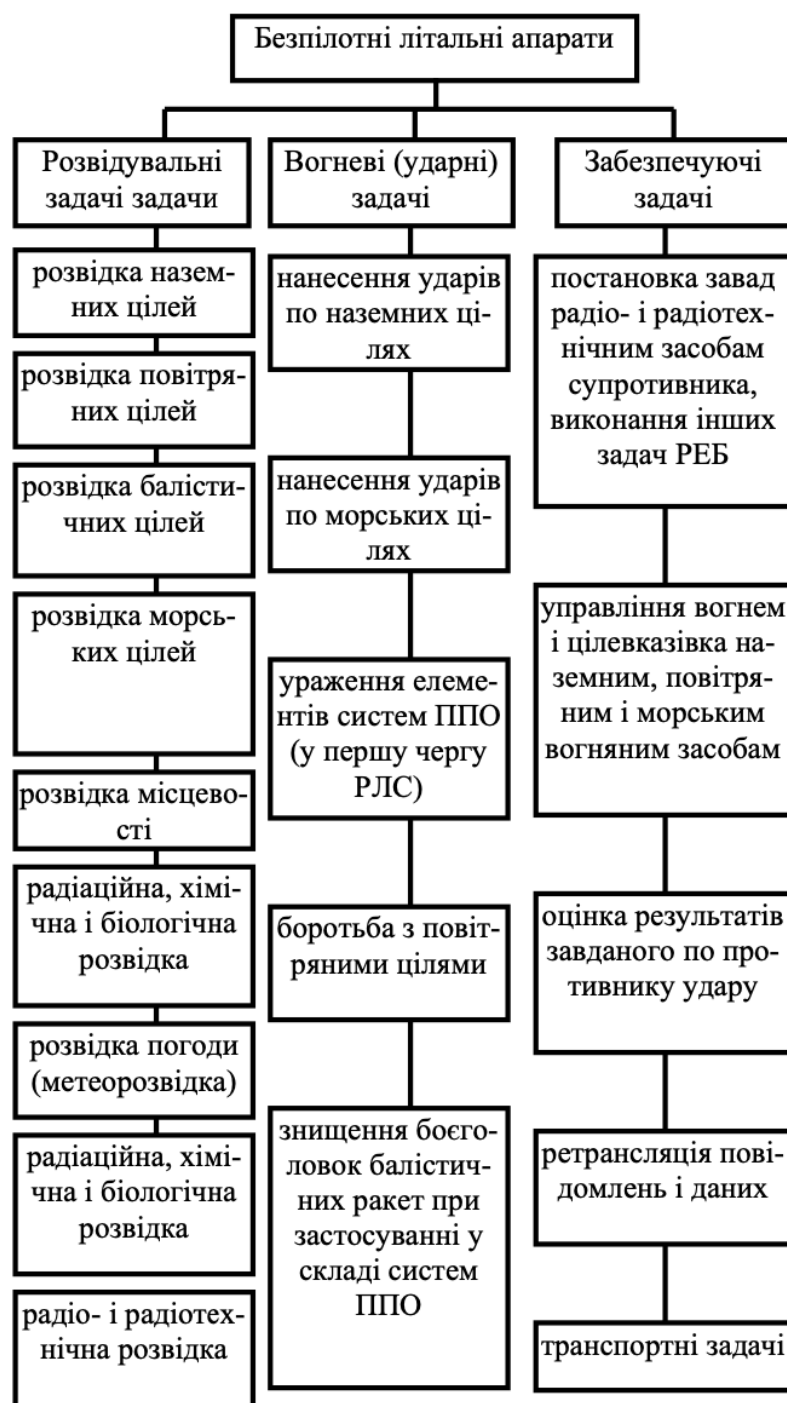


Рис. 1.1.9 Схема «Класифікація БПЛА за призначенням»

Напрямки досліджень в галузі БПЛА продовжують розвиватися, оскільки зростає кількість та різноманітність БПЛА. Еволюція цих напрямків відбувається завдяки задоволенню потреб користувачів. Університети, державні установи, технологічні компанії та науково-дослідні організації займаються дослідженнями

залежно від своїх інтересів. Однак дослідження в галузі БПЛА переважно поділяються на дві області.

Перша область досліджень зосереджена на ефективному використанні БПЛА. У цій області вони активно досліджуються державними установами, компаніями в оборонному секторі та університетами.

Наприклад, Василь Матухно досліджував ефективність використання БПЛА для пошуку потерпілих. Роботи мають багато переваг перед людьми в пошуково-рятувальних роботах, можуть діяти з безпечної відстані, охоплювати широкий діапазон і комплектуватися датчиками для виявлення ознак життя та більш точного розпізнавання загроз. Дрони використовуються вже кілька років, які наймовірно ефективні при пошуку зниклих безвісти. За допомогою тепловізійних зображень пошук зниклих безвісти може продовжуватися в темряві та ще складніших умовах, де потрібно завдячити М. Бімберу, який працював, щоб подолати це обмеження, використовуючи алгоритм бортового оптичного розрізу (AOS) у поєднанні з тепловізією [3].

Друга область зосереджена на розвитку безпілотних систем транспортних засобів, в якій активну роль відіграє вже приватний сектор. Хоча університети та науково-дослідні організації також беруть участь у цьому процесі.

До прикладу, про проблеми правового регулювання безпілотного транспорту писали Мисливий В. та Кліпановський А. [4].

Незважаючи на те, що ці дві області можуть здатися непов'язаними, проблеми, що виникають в одній галузі, можуть суттєво вплинути на іншу. Наприклад, рівень автономності БПЛА визначає типи місій, які можуть бути виконані. У цілому, дослідницькі зусилля в обох сферах спрямовані на досягнення спільної мети – максимального використання цих машин як у військових, так і в цивільних цілях.

Квадрокоптерні БПЛА є літаючими пристроями, що використовують підйомну силу, що створюється декількома роторами, і через це значна частина доступної енергії витрачається на ротори для підтримки апарату в повітрі. У цій концепції формулюються та вирішуються дві задачі оптимального керування.

У першій задачі обчислюється оптимальне керування з мінімальним споживанням енергії для заданих початкової і кінцевої конфігурацій з урахуванням кутової швидкості роторів (див. рис. 1.1.10).

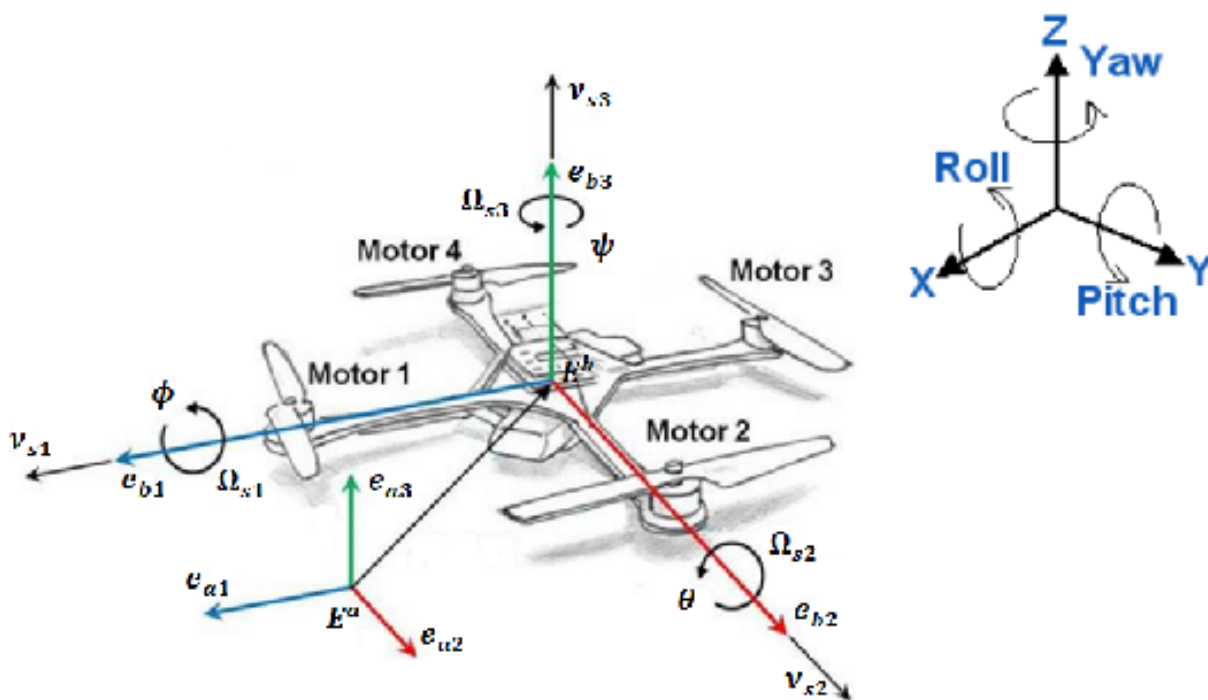


Рис. 1.1.10 Система координат коптерного типу БпЛА

У другій задачі обчислюється оптимальне керування з мінімальним часом для заданої енергії. Запропонований метод ілюструється симуляційним експериментом для квадрокоптерного безпілотного літального апарату.

Нерідко БпЛА заводського чи кустарного виробництва покращують та модифікують. Метою є покращення можливостей дронів, наприклад, збільшення часу польоту, дальності керування і передавання відеозображення оператору, поява у БпЛА нових можливостей (наприклад, перевезення, скидування предметів, потужний ліхтар тощо). Збільшення часу польотів досягається збільшенням запасів енергії БпЛА. У разі електричного БпЛА — це збільшення акумулятора дрона шляхом встановлення більш ємного (або додаткового) акумулятора, наприклад, за допомогою акумуляторної збірки з елементів 18650 чи 21700 та балансувальної плати для них. У випадку БпЛА, силовою установкою якого є двигун внутрішнього згорання, зростання дальності польоту досягається збільшенням бака або

встановленням додаткового бака для пального. Проте слід зважати на те, що будь-яке підвищення ваги БпЛА від'ємно впливає на його льотні показники, тож будь-яке підвищення ваги БпЛА є дуже обмеженим. Збільшення ваги БпЛА без шкоди для його застосування та довговічності – зазвичай в межах 20-50% від його початкової маси. Подальше збільшення дуже негативно впливає на всі аспекти використання БпЛА і погіршує його технічний стан.

Для розуміння проблеми енергоефективності коптерних схем безпілотних літальних апаратів важливо провести огляд літератури та попередніх досліджень, що вже були проведені у цій галузі. Це дозволить ознайомитись з наявними знаннями та досягненнями, а також визначити прогалини, які можна заповнити своїм дослідженням.

В літературі та наукових джерелах було проведено дослідження, що стосуються енергоефективності коптерних схем БпЛА. Наприклад, були досліджені аспекти енергозбереження у системах живлення БпЛА, вплив аеродинамічних характеристик на ефективність польоту, аналіз використання різних типів гвинтомоторних систем тощо.

Наприклад, питання енергозбереження вивчав Денис Карабецький у своїй дисертації «Автоматизоване проектування гібридних сонячних енергетичних систем» [5]. Цікавим є експериментальне дослідження профілю з щитком Крюгера в аеродинамічній трубі УТАД-2 НАУ Розбицького та Бондара, які описують аеродинаміку БпЛА [6].

Один із підходів до підвищення енергоефективності БпЛА полягає в оптимізації конструкції та виборі оптимальних параметрів гвинтомоторних систем. В цьому контексті вивчалися різні типи гвинтомоторних систем, такі як гвинти з різними характеристиками, комплексні системи управління кутом нахилу лопаток та системи контролю обертання гвинта.

Системи управління кутом нахилу лопаток в БпЛА використовуються для підвищення маневреності, ефективності польоту та стабілізації. Вони дозволяють динамічно змінювати кут атаки лопаток гвинтів, оптимізуючи тягу та енергоспоживання в різних умовах польоту. Це особливо важливо для БпЛА, що

виконують складні завдання або працюють в непередбачуваних середовищах. Покращення систем управління кутом нахилу лопаток спрямоване на забезпечення більш ефективного та адаптивного управління польотом.

Системи контролю обертання гвинта в БпЛА дуже важливі для точного управління швидкістю обертання гвинтів. Вони забезпечують стабільність, контроль тяги та ефективність польоту. Ці системи часто включають електронні швидкісні контролери (ESC), які керують електричними моторами, що приводять в обертання гвинти. Оптимізація цих систем може значно вплинути на покращення загальної продуктивності та енергоефективності БпЛА, особливо в умовах, що вимагають високої маневреності або тривалого польоту.

Деякі дослідження також зосереджувалися на впливі параметрів гвинтомоторних систем, таких як кут нахилу лопаток, кількість лопаток, діаметр гвинта, на продуктивність та енергоефективність БпЛА. Дослідники проводили експериментальні випробування, моделювання та симуляції для визначення оптимальних параметрів гвинтомоторної системи.

Одним із досліджень, що вивчає вплив параметрів гвинтомоторних систем, таких як кут нахилу лопаток, є робота Александра Ковачевича та його колег з факультету механічної інженерії університету в Белграді. Вони зосередилися на розробці оптимальних композитних роторних лопатей для невеликих БпЛА та дослідженні їх аеродинамічної продуктивності як обчислювально, так і експериментально. Використовуючи штучний інтелект (генетичний алгоритм), вони оптимізували аерофіль лопатей на основі шести вхідних параметрів. Дослідження включало різні обчислювальні методи, такі як вихрові методи та обчислювальна гідродинаміка, теорія моменту лопатевого елемента та метод скінченних елементів, для передбачення аеродинамічних показників оптимізованого аерофілю та повного ротора, а також структурної поведінки лопатей. Нарешті, вони виготовили композитну лопать і також експериментально визначили продуктивність ротора за допомогою вимірювань тяги та крутного моменту [7].

Параметри гвинтомоторних систем, такі як кут нахилу лопаток та кількість лопаток, мають значний вплив на продуктивність та ефективність БпЛА. Кут нахилу

лопаток впливає на тягу та ефективність гвинтів, дозволяючи оптимізувати властивості польоту для різних умов. Кількість лопаток також важлива, оскільки вона впливає на аеродинамічні характеристики та шум гвинта. Вибір оптимальних параметрів дозволяє покращити маневреність, стабільність та енергоефективність БпЛА.

Дослідження, які вивчають вплив параметрів гвинтомоторних систем на БпЛА, включають роботу з кутом нахилу лопаток, кількістю лопаток, а також аеродинамічною продуктивністю гвинтів. Ось деякі з ключових висновків з проведених досліджень:

Дослідження, проведене Hang Zhu та співавторами, вивчає аеродинамічну продуктивність гвинтів для мультироторних БпЛА. Вони аналізували вплив діаметру та кута нахилу гвинтів на тягу, крутний момент та статичний коефіцієнт тяги ( $C_T$ ). Виявлено, що тяга та крутний момент збільшуються зі зростанням швидкості обертання, діаметру та кута нахилу гвинтів. Такі результати мають велике значення для вибору більш підходящих гвинтів для БпЛА та подальшого покращення продуктивності їх динамічних систем. Дослідження було опубліковано в журналі "Shock and Vibration" у 2021 році [8].

Ці дослідження показують, що вивчення та оптимізація параметрів гвинтомоторних систем, таких як кут нахилу лопаток та кількість лопаток, мають важливе значення для підвищення продуктивності та ефективності БпЛА. Ці роботи підкреслюють значимість комп'ютерного моделювання та експериментального тестування у розробці оптимальних гвинтомоторних систем для різних умов польоту.

У світлі цих досліджень можна зробити висновок, що енергоефективність коптерних схем БпЛА може бути значно поліпшена шляхом оптимізації гвинтомоторних систем та врахування різних факторів, таких як аеродинамічні характеристики, вага та розміри, енергетичне джерело та система живлення, управління та керування польотом.

Продовження досліджень у цьому напрямку дозволить покращити розуміння проблеми енергоефективності коптерних схем БпЛА та розробити ефективніші

методики оцінки та підбору гвинтомоторної групи. У наступних розділах дипломної роботи будуть розглянуті деталізовані методики та результати проведених досліджень для досягнення поставлених цілей.

## 1.2 Опис теоретичних основ та концепцій, що використовуються у дослідженні.

У даному розділі будуть описані теоретичні основи та концепції, які використовуються в дослідженні енергоефективності коптерних схем БПЛА.

### 1.2.1 Аеродинаміка коптерних схем БПЛА

Аеродинаміка відіграє важливу роль у розумінні та оцінці енергоефективності коптерних схем БПЛА. Аеродинаміка – розділ аеромеханіки, що вивчає закони руху газоподібного середовища (передусім повітря) у взаємодії з обтічним тілом. А. використовують при розробленні авіац., ракетно-косміч., автомоб., артилер., турбомаш. техніки тощо, коли опір газу впливає на процес руху [9].

Основні принципи аеродинаміки, такі як підйомна сила, опір повітря та вплив аеродинамічних параметрів на польотні характеристики, досліджуються для розуміння впливу аеродинамічних факторів на споживання енергії та ефективність БПЛА.

Орієнтація двигуна  $\eta P_i$  визначається як

$$\eta P_i = CR \cdot \begin{bmatrix} \sin \chi_i \cdot \sin \gamma \\ -\cos \chi_i \cdot \sin \gamma \\ \cos \gamma \end{bmatrix} .$$

Тут  $\gamma$  являє собою кут нахилу рушія. Якщо  $\gamma = 0$ , тоді ми маємо найпоширеніший «плоский» мультикоптер. Різновиди мультикоптерів з точки зору розташування двигунів зображено на рис. 1.2.1:



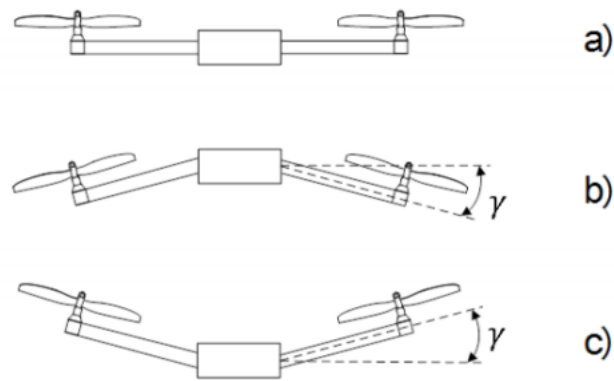


Рис 1.2.1 Різновиди нахилу ГМГ мультикоптерів

### 1.2.2 Енергетичні джерела та системи живлення

Вибір енергетичного джерела та системи живлення є ключовим аспектом у досягненні енергоефективності БПЛА. Розглядаються різні типи енергетичних джерел, такі як батареї, паливні елементи, сонячні панелі тощо, а також різні системи живлення, включаючи бездротове заряджання та управління енергією, з метою забезпечення оптимального використання енергії та продовження часу польоту.

На сьогодні використовується 5 основних типів акумуляторів:

1. Pb (lead-acid або свинцево-кислотні);
2. NiCd (нікель-кадмієві);
3. NiMH (нікель-металгідридні);
4. LiPo (літій-полімерні);
5. LiFePO<sub>4</sub> (літій-феррофосфатні, також відомі як A123, LiFe, LiFo, літій-фосфати).

Свинцево-кислотні (Pb) акумулятори стосовно БПЛА використовуються, практично, тільки як джерело енергії для підзарядки в польових умовах інших типів акумуляторів і як джерело живлення стартера і стартової панелі для силових установок з ДВЗ. Дуже часто як акумулятор виступає бортовий акумулятор автомобіля. Такі акумулятори характерні невибагливістю, високими струмами віддачі, але мають велику вагу і повільно заряджаються.

Нікель-кадмієві (NiCd) акумулятори часто використовуються для живлення передавачів, а також як силові в тих випадках, де важливі струми віддачі і великий ресурс. Не кожен NiCd акумулятор може бути використаний як силовий. Побутові NiCd батареї, як правило, не здатні до віддачі великих струмів і придатні лише для живлення передавача і в деяких випадках — бортової електроніки на БПЛА з ДВЗ. Для живлення силової установки можна використовувати лише промислові акумулятори, розраховані на великі струми. NiCd акумулятори характерні своєю невибагливістю, але мають досить велику вагу при невеликій питомій ємності. Недоліком, який дещо ускладнює їх експлуатацію, є так званий ефект пам'яті, про який ми скажемо трохи нижче.

Нікель-металгідридні (NiMH) акумулятори прийшли на заміну NiCd. Все вищезазначене про NiCd, в цілому, відноситься і до NiMH. Відмінність NiMH у тому, що вони мають, як правило, помітно більшу ємність при тій самій вазі, як і аналогічні NiCd. «Ефект пам'яті» у них менш виражений. Термін придатності NiMH зазвичай менше, ніж NiCd.

В останні роки для літаючих моделей та БПЛА набули великого поширення літій-полімерні (LiPo) акумулятори. Вони легкі, мають дуже високу ємність відносно їх ваги і розміру, високі струми віддачі, можливість швидкого заряду. Завдяки цьому вони стали основним джерелом енергії для електричних силових установок БПЛА. На жаль, не обійшлося і без недоліків: LiPo акумулятори виявилися досить критичними до режимів експлуатації. У разі розрядження такої батареї нижче за допустимий рівень вона безповоротно виходить з ладу, а перевищення напруги на батареї може призвести до її вибухового самозаймання. Тим не менш, переваги LiPo акумуляторів переважають їх недоліки, і тому їх використовують, дотримуючись певних правил експлуатації.

Нещодавно з'явилися батареї, що випускаються американською компанією «A123 Systems», звідки й пішла їхня популярна назва «A123». Вони є розвитком напряму літій-полімерів та у своїй основі мають хімічну формулу  $\text{LiFePO}_4$  (ферофосфат літію). Завдяки цій формулі вони отримали багато альтернативних назв — LiFe, LiFo, літійфосфати тощо. Дані батареї виявилися, на перший погляд, просто

знахідкою: невибагливі, стійкі до ударів, довгоживучі, невибагливі до частого балансування, не бояться помірних перезаряджень і глибоких розряджень, віддають великі струми, і головне — штатно допускають дуже швидку зарядку за 15 — 20 хв, що в польових умовах просто неоціненно. Однак і тут не обійшлося без недоліків: обмежений ряд ємностей (на виході лише 2300 мАг), більша, порівняно з LiPo вага, низька напруга на банку і досить велика його просадка під навантаженням. Якби не це, вони могли б зайняти нішу LiPo.

Для зарядки всіх типів перелічених вищетипів бата реї використовується всього два основних методи: метод постійного струму з деякими варіаціями (для NiCd, NiMh) і метод CC-CV (для Pb, LiPo, LiFeP04). Докладно зупинитись на особливостях зарядки кожного типу ми не будемо, розглянемо лише NiCd, NiMh та LiPo[10].

### 1.2.3 Управління та керування польотом

Ефективне управління та керування польотом є важливими аспектами для забезпечення енергоефективності БПЛА. Розглядаються різні методики та алгоритми управління, включаючи оптимальне планування маршрутів, розподіл енергії між приводами, автоматичне управління стабілізацією та навігацією, з метою зниження споживання енергії та підвищення ефективності польоту. У Правилах виконання польотів безпілотними авіаційними комплексами державної авіації України передбачено різні експлуатаційні конфігурації пункту дистанційного пілотування, такі як: ручне управління; керування за допомогою автопілота; керування за допомогою точок маршруту; керування БПЛА у межах прямої видимості під час зльоту та/або посадки з наступною передачею управління для виконання польоту за межами прямої видимості; Контроль доступу зовнішнього пілота та захист пункту дистанційного пілотування[1]. Ці Правила розроблені з урахуванням стандартів та рекомендованої практики міжнародної організації цивільної авіації (далі - ICAO) та організації Північноатлантичного договору (NATO).

### 1.2.4 Методи оцінки енергоефективності коптерних схем БПЛА

В дослідженні використовуються різні методи оцінки енергоефективності коптерних схем БПЛА. До них належать математичні моделі, експериментальні

вимірювання, аналіз даних та моделювання, статистичні методи тощо. Ці методи дозволяють кількісно оцінити рівень енергоефективності та виконати порівняльний аналіз різних коптерних схем БПЛА.

#### 1.2.5 Оптимізація гвинтомоторної групи

Гвинтомоторна група відіграє важливу роль у роботі БПЛА і має значний вплив на його енергоефективність. В дослідженні розглядаються концепції та методи оптимізації гвинтомоторної групи, включаючи вибір оптимального типу приводів, конфігурацію гвинтомоторів, розрахунок потужності та ефективності приводів, з метою підвищення загальної енергоефективності БПЛА.

#### 1.2.6 Інтеграція технологій "розумних" систем

В останні роки "розумні" системи, такі як штучний інтелект, машинне навчання, InternetofThings (IoT) та інші, знайшли широке застосування у сфері БПЛА. Розглядаються концепції та методи інтеграції цих технологій у коптерні схеми БПЛА з метою покращення енергоефективності, оптимізації функціональності та автономності.

«У сучасному світі реальною стала ідея створення повністю автономного БпЛА. Для досягнення цієї мети використовують технології штучного інтелекту та комп'ютерного зору, що обумовлюють необхідність встановлення додаткового корисного навантаження. Суттєво підвищити точність позиціонування БпЛА, рівень його автономності та завадозахищеності дозволяють інтегровані інерціально-супутникові навігаційні системи та технології пасивної оптичної орієнтації.

Однією з найперспективніших сфер застосування дронів для України, як аграрної держави з давніми традиціями землеробства, є моніторинг стану здоров'я рослинності та прогнозування урожайності земель сільськогосподарського призначення. Технологія базується на мультиспектральному скануванні та визначенні індексу вегетації.

Для виконання масштабних робіт використовують рої дронів. Модель їх взаємодії залежить від рівня автономності БпЛА. Пріоритетним напрямком розвитку даної технології є створення повністю самостійних роїв, що не потребують додаткових інструкцій від оператора в ході виконання поставлених задач.

Налагодження комунікації між БпЛА зі штучним інтелектом наразі знаходиться в процесі розробки, але є кілька алгоритмів, що вже успішно використовуються.

Проблема співвідношення палива, ваги та відстані, напевно, завжди буде актуальною для БпЛА. На сьогоднішній день для подовження часу перебування дрону в повітрі та збільшення радіусу його дії найбільш перспективними є технології гібридних паливних систем та водневі двигуни. Гібридні двигуни є легкими, більш ефективними за традиційні акумулятори і потребують менше часу для заправлення.

Детально розглянуті теоретичні аспекти, що стосуються цих основ та концепцій, і їх використання у дослідженні енергоефективності коптерних схем БПЛА та результати огляду літератури та попередніх досліджень будуть сприяти розумінню сучасного стану цієї проблеми та визначенню потреби у подальших дослідженнях» [11].

## **Висновок до розділу 1**

Висновок до першого розділу "Теоретичний огляд" свідчить про важливість та актуальність дослідження енергоефективності коптерних схем безпілотних літальних апаратів (БпЛА). В ході огляду літератури та попередніх досліджень, який включає підрозділи 1.1 та 1.2, було ретельно проаналізовано існуючі концепції та теоретичні основи, пов'язані з енергоефективністю коптерних схем.

У підрозділі 1.1 проведений огляд літератури, що стосується енергоефективності коптерних схем БпЛА. Визначені основні напрямки досліджень та досягнення в цій області. Виявлено, що ефективне використання енергії в цих системах є ключовим аспектом для покращення їх функціональності та продуктивності. Підкреслено необхідність подальших досліджень для вдосконалення методик та стратегій оцінки енергоефективності.

У підрозділі 1.2 представлений опис теоретичних основ та концепцій, що використовуються у дослідженні. Розглянуті ключові аспекти, такі як аеродинамічні характеристики, характеристики гвинтомоторної групи, системи живлення та

управління. Визначено, як ці фактори взаємодіють у контексті енергоефективності та впливають на роботу коптерних схем.

Висновки з цього розділу дають загальний огляд сучасного стану досліджень з енергоефективності коптерних схем БпЛА і визначають основні аспекти, які вимагають подальших розглядів та досліджень у рамках даної роботи. Здійснений аналіз літературних джерел та теоретичних підходів створює підґрунтя для проведення емпіричних досліджень та розробки методики оцінки енергоефективності коптерних схем БпЛА.

## РОЗДІЛ 2

### МЕТОДИКА ОЦІНКИ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ КОПТЕРНИХ СХЕМ БПЛА

#### 2.1 Опис розробленої методики

У даному розділі наводиться детальний опис розробленої методики оцінки енергоефективності коптерних схем безпілотних літальних апаратів (БПЛА). Методика спроектована для систематичного та об'єктивного аналізу енергетичних витрат в контексті різних режимів польоту та конфігурацій коптерної схеми.

##### 2.1.1 Параметризація коптерної схеми

Детальний опис параметрів коптерної схеми, таких як характеристики гвинтомоторної групи, аеродинамічні параметри, режими роботи моторів та системи живлення.

Розглянемо кілька ключових аспектів:

Щодо характеристик гвинтомоторної групи, важливо визначити тип та кількість гвинтів, їхні діаметр і кут нахилу. Також слід описати тип та характеристики моторів, включаючи їхню потужність, обертовий момент і ефективність. Керування гвинтовою групою, зокрема можливість індивідуального управління кожним гвинтом, визначає гнучкість та точність керування.

Щодо аеродинамічних параметрів, важливо розглянути підйомну силу та опір повітря, центр тяжіння та аеродинамічний профіль гвинтів. Ці характеристики визначають ефективність та стійкість коптера в різних умовах польоту.

Режими роботи моторів включають робочі точки, швидкість обертання, а також процеси запуску та зупинки. Це важливо для оптимізації енергоспоживання в різних фазах польоту.

Система живлення включає тип та потужність акумуляторів, системи зарядки та енергоефективність системи в цілому. Врахування всіх цих параметрів дозволяє

визначити, наскільки ефективно використовується енергія для живлення моторів та електроніки.

### 2.1.2 Математичні моделі

Розглядається розробка математичних моделей, що враховують аеродинамічні властивості, роботу гвинтів, витрати енергії та їх взаємозв'язок. Ці моделі використовуються для прогнозування енергетичних характеристик коптерної схеми.

Розробка математичних моделей для безпілотних літальних апаратів (БПЛА), що враховують аеродинамічні властивості, роботу гвинтів, витрати енергії та їх взаємозв'язок, є ключовою для розуміння та оптимізації їх енергетичної ефективності.

Аеродинамічні властивості коптера, такі як підйомна сила та опір повітря, враховуються у математичних моделях на основі принципів аеродинаміки. Параметри, такі як аеродинамічний коефіцієнт, площа крил та гвинтових систем, використовуються для моделювання впливу аеродинаміки на польот.

Моделі також враховують динаміку роботи гвинтів та моторів, описуючи їх обертовий момент, кут нахилу гвинтів та ступінь ефективності. Це важливо для визначення потужності, яка витрачається на підтримання польоту та виконання завдань.

Для аналізу витрат енергії на різних етапах польоту, таких як зліт, підйом, польот на постійній висоті та посадка, моделі включають витрати енергії на підтримання польоту та подолання опору повітря, а також втрати енергії при переході між режимами. Для цього необхідно ефективно збирати та обробляти дані, задачі управління збором даних моніторингу БПЛА в безпроводних сенсорних мережах описує Романюк А. В. [12].

Взаємозв'язок між аеродинамічними властивостями, роботою гвинтів та системою живлення вираховується в математичних моделях. Аналіз цих взаємозв'язків дозволяє визначити оптимальні стратегії управління для максимізації енергоефективності. Такі моделі надають можливість віртуального тестування та оптимізації конфігурацій коптерних систем для досягнення максимальної енергоефективності в різних умовах польоту.



### 2.1.3 Оцінка та порівняння

Аналізуються отримані дані, визначаються критерії енергоефективності та проводиться порівняння з існуючими методиками.

Оцінка даних. Отримані дані піддаються ретельному аналізу для визначення ключових параметрів енергоефективності коптерних схем БПЛА. Це включає в себе вимірювання витрат енергії на різних етапах польоту, оцінку впливу аеродинамічних характеристик та роботи гвинтів на загальну ефективність.

Визначення критеріїв енергоефективності. На основі отриманих даних формулюються критерії енергоефективності, які враховують різні аспекти функціонування коптерної схеми. Це може включати в себе підвищену тривалість польоту, зменшення витрат енергії на утримання польоту та оптимальне використання енергії на різних етапах.

Через обмежений енергетичний ресурс БПЛА є проблема збільшення тривалості його польоту, яку пропонується вирішити завдяки оптимізації процесу енергоспоживання за допомогою якісного керування, що враховує взаємозалежність енергетичних та інформаційних процесів [13].

Порівняння з існуючими методиками. Отримані результати порівнюються з існуючими методиками оцінки енергоефективності коптерних схем БПЛА. Це дозволяє визначити переваги та недоліки розробленої методики в порівнянні зі стандартами та конкуруючими підходами.

### 2.1.4 Оптимізація та рекомендації

Враховуючи результати аналізу, розробляються стратегії оптимізації для покращення енергоефективності коптерних схем БПЛА. Формулюються рекомендації для практичного використання отриманих даних.

Оптимізація енергоефективності. На основі виявлених слабких місць та областей для поліпшення розробляються конкретні стратегії оптимізації. Це може включати в себе удосконалення аеродинамічних характеристик, оптимізацію роботи гвинтів, або впровадження нових технологій у схему живлення.

Рекомендації для практичного використання. Розробляються конкретні рекомендації для інженерів, дослідників та розробників, які працюють з коптерними

схемами БпЛА. Це може включати в себе керівництво з вдосконалення енергоефективності під час розробки нових схем, а також рекомендації для модифікації існуючих систем.

Цей підрозділ надає повний огляд розробленої методики та визначає кроки, необхідні для об'єктивної та надійної оцінки енергоефективності коптерних схем безпілотних літальних апаратів.

Також корисно знати про моделі прийняття рішень оператора БпЛА. Науковці зазначають, що на основі поняття ряду пріоритету вирішуються, зокрема, лексикографічні задачі оптимізації. У цьому випадку вектор ефективності допускає упорядкування своїх компонентів за важливістю. Однак на практиці, ланцюг рішень дуже швидко обривається і багатокритеріальне рішення виявляється тривіальним. Більш багатим за змістом є метод справедливих поступок, що теж заснований на ієрархічному ранжуванні часткових критеріїв, але дає змогу довести ланцюг рішень до останнього критерію[14].

## **2.2 Пояснення використуваних параметрів та критеріїв оцінки**

У цьому підрозділі розглядаються основні параметри та критерії, які використовуються для оцінки енергоефективності коптерних схем безпілотних літальних апаратів.

### **2.2.1 Параметри коптерної схеми**

Визначається перелік та значення ключових параметрів, таких як обертова швидкість гвинтів, підйомна сила, опір повітря, кут нахилу гвинтів, ефективність моторів тощо. Кожен з цих параметрів впливає на енергоефективність коптерної схеми, і їх вимірювання дозволяє отримати детальні дані для подальшого аналізу.

Підйомна сила — це сила, що діє перпендикулярно до напрямку руху об'єкта через рідину (якою може бути як повітря, так і вода) та є ключовим фактором у здатності літального апарата підніматися та залишатися у повітрі. Для коптерів, таких як квадрокоптери, підйомна сила генерується обертанням гвинтів.

Основні принципи підйомної сили для БпЛА:

а) аеродинамічний профіль гвинтів: коли лопаті гвинта обертаються, вони створюють різницю тисків між верхньою та нижньою поверхнею лопаті, що призводить до виникнення підйомної сили.

б) кут атаки лопатей: це кут між хордою лопаті гвинта та напрямком руху повітря. Зміна кута атаки може збільшувати або зменшувати підйомну силу.

в) швидкість обертання гвинтів: збільшення швидкості обертання гвинтів збільшує підйомну силу, що дозволяє БпЛА підніматися або зберігати певну висоту.

г) кількість та розташування гвинтів: більша кількість гвинтів може забезпечити більшу підйомну силу. Розташування гвинтів також впливає на стабільність та маневреність БпЛА.

д) аеродинамічні властивості: опір повітря та аеродинамічна ефективність дизайну БпЛА також впливають на здатність апарату генерувати підйомну силу.

Управління підйомною силою є фундаментальним для керування політними властивостями БпЛА, включаючи зльоти, посадки, польоти на визначену висоту та маневрування.

### 2.2.2 Критерії енергоефективності

Описуються критерії, за якими визначається енергоефективність. Це може включати коефіцієнти ефективності, споживання енергії на одиницю витрат підйомної сили, або інші параметри, які характеризують продуктивність системи в контексті витрат енергії.

Енергоефективність коптерів, особливо мультироторних безпілотних літальних апаратів (БпЛА), визначається на основі декількох ключових критеріїв. Ось деякі з основних:

а) час польоту на один заряд батареї: один з основних показників енергоефективності, оскільки він вказує на тривалість польоту БпЛА без потреби в перезарядці.

б) витрата енергії на одиницю ваги: вимірюється як кількість енергії, яку БпЛА витрачає для підняття та утримання одного кілограма ваги у повітрі.

в) енергетична щільність акумулятора: вища енергетична щільність акумулятора дозволяє БпЛА літати довше на одному заряді без значного збільшення ваги.

г) ефективність гвинтів: включає в себе їх здатність генерувати необхідну тягу при мінімальному споживанні енергії.

г) ефективність моторів: висока ефективність моторів знижує втрати енергії та підвищує загальну продуктивність.

д) ефективність електронного швидкісного контролера (ESC): визначає, наскільки ефективно ESC керує потоком енергії до моторів, зменшуючи втрати потужності.

е) опір повітря та аеродинамічна ефективність: аеродинамічно ефективні конструкції знижують опір повітря та споживання енергії під час польоту.

є) вага та балансування: оптимізація ваги БпЛА для забезпечення максимальної енергоефективності, зокрема шляхом використання легких матеріалів та ефективного балансування.

ж) температурна стійкість акумулятора: акумулятори, що зберігають високу ефективність при різних температурах, можуть підвищувати загальну енергоефективність.

з) режими польоту та програмне забезпечення: програмне забезпечення та режими польоту, що оптимізують використання енергії (наприклад, режими економії енергії), можуть підвищувати енергоефективність.

Ці критерії дозволяють оцінювати та порівнювати енергоефективність різних моделей БпЛА, а також використовуються при розробці та налаштуванні нових моделей для забезпечення оптимального споживання енергії.

### 2.2.3 Методи вимірювання та обчислення

Наводиться опис методів, які використовуються для вимірювання або обчислення вищезазначених параметрів та критеріїв. Це може включати в себе використання спеціалізованих датчиків, математичних моделей чи експериментальних досліджень.

Для вимірювання та обчислення ключових параметрів та критеріїв енергоефективності коптерів використовуються різні методи та інструменти. Ось деякі з них:

а) тестування тяги гвинтів: зазвичай використовуються спеціалізовані тестові стенди для гвинтів, які можуть точно вимірювати тягу, що генерується кожним гвинтом.

б) вимірювання обертового моменту: для цього можуть використовуватися торсійні динамометри, які визначають момент, що виникає на валу мотора.

в) тахометри: для вимірювання швидкості обертання гвинтів можуть використовуватися тахометри.

г) ватметри та аналізатори енергії: використовуються для вимірювання енергоспоживання БпЛА, зокрема споживання енергії моторами та електронними компонентами.

г) ваги та балансувальні стенди: використовуються для визначення ваги БпЛА та його центру маси.

д) аеродинамічні тунелі: для вивчення аеродинамічних властивостей БпЛА та визначення аеродинамічного опору.

е) сенсори тиску та швидкості вітру: для аналізу аеродинамічних характеристик та поведінки БпЛА при різних швидкостях вітру та умовах польоту.

є) системи GPS та інерційні навігаційні системи (INS): для точного визначення позиції, швидкості та орієнтації БпЛА, що допомагає оцінити його керованість та стабільність.

ж) спектральні аналізатори: для вимірювання вібрацій та аналізу шуму, що видають БпЛА.

з) тестування акумуляторів: включає в себе вимірювання напруги, струму, ємності, та визначення загальної тривалості роботи акумулятора.

и) комп'ютерне моделювання: використовується для теоретичного аналізу аеродинамічних властивостей та поведінки БпЛА за різних умов.

Ці інструменти та методики дозволяють точно оцінити енергоефективність БпЛА, що є критично важливим для їх розробки, налаштування та вдосконалення.

## 2.2.4 Статистичні та динамічні аспекти

Розглядаються аспекти збору та аналізу даних в динаміці. Це може включати статистичні показники, такі як середні та відхилення, а також динамічні зміни параметрів під час польоту.

Збір та аналіз даних в динаміці, особливо в контексті безпілотних літальних апаратів (БпЛА) або коптерів, охоплює різноманітні аспекти. Цей процес важливий для розуміння поведінки апарату в реальних умовах польоту та для оптимізації його конструкції та алгоритмів управління. Ось деякі ключові аспекти збору та аналізу даних в динаміці:

а) датчики та інструменти збору даних: використання датчиків, таких як акселерометри, гіроскопи, барометри, GPS, лідари, та інерційні навігаційні системи (INS) для збору даних про положення, швидкість, орієнтацію, висоту та інші важливі параметри польоту.

б) запис польотних даних: використання польотних реєстраторів або "чорних скриньок" для збору та зберігання даних польоту, які можуть бути проаналізовані після польоту.

в) реальний час vs. постфактум аналіз: збір даних у реальному часі для моніторингу та коригування польоту на льоту, а також детальний аналіз даних після польоту для виявлення тенденцій, виявлення проблем та вдосконалення конструкції.

г) аналіз шуму та вібрацій: важливий для визначення стійкості та надійності БпЛА, а також для виявлення потенційних механічних проблем.

г) використання програмного забезпечення для аналізу даних: спеціалізоване програмне забезпечення для обробки та аналізу даних, що збираються, з можливістю моделювання польотних умов та аналізу ефективності різних конфігурацій або алгоритмів управління.

д) тестування під навантаженням та в екстремальних умовах: це включає аналіз даних, зібраних під час польотів з повним навантаженням або в екстремальних метеорологічних умовах.

е) статистичний аналіз та машинне навчання: використання статистичних методів та алгоритмів машинного навчання для виявлення закономірностей, аномалій та для оптимізації алгоритмів управління.

є) комунікації та протоколи передачі даних: надійні та ефективні методи передачі даних від БпЛА до оператора або центру управління для аналізу в реальному часі.

ж) безпека даних: забезпечення цілісності та безпеки даних, які збираються та аналізуються, особливо важливо в комерційних та військових застосуваннях.

з) інтеграція з іншими даними: поєднання даних з БпЛА з іншими джерелами даних (наприклад, метеорологічними даними) для всебічного аналізу польотних умов.

Збір та аналіз даних в динаміці дозволяє отримати глибоке розуміння поведінки БпЛА, покращує можливості управління та виявлення несправностей, а також сприяє подальшому розвитку та оптимізації цих складних систем.

### 2.2.5 Валідація та порівняння

Розглядається методика валідації отриманих результатів та їх порівняння з раніше встановленими стандартами або результатами інших досліджень.

Цей підрозділ надає чітке розуміння використовуваних параметрів та критеріїв, а також методів їх визначення та аналізу у контексті оцінки енергоефективності коптерних схем БпЛА.

## 2.3 Процедури вимірювань та аналізу даних

У цьому підрозділі розглядаються конкретні процедури для здійснення вимірювань та аналізу даних, необхідних для визначення енергоефективності коптерних схем безпілотних літальних апаратів (БпЛА).

### 2.3.1 Вимірювання параметрів коптерної схеми

Визначається методика вимірювання ключових параметрів, таких як обертова швидкість гвинтів, підйомна сила, опір повітря та інші. Використовуються спеціалізовані датчики, експериментальні установки або обчислювальні моделі.

Зокрема, для характеристик гвинтомоторної групи використовуються датчики обертання та інші вимірювальні пристрої для визначення діаметра гвинтів, кута нахилу, швидкості обертання та обертового моменту. Це дозволяє точно визначити параметри, які визначають ефективність гвинтомоторної групи [15].

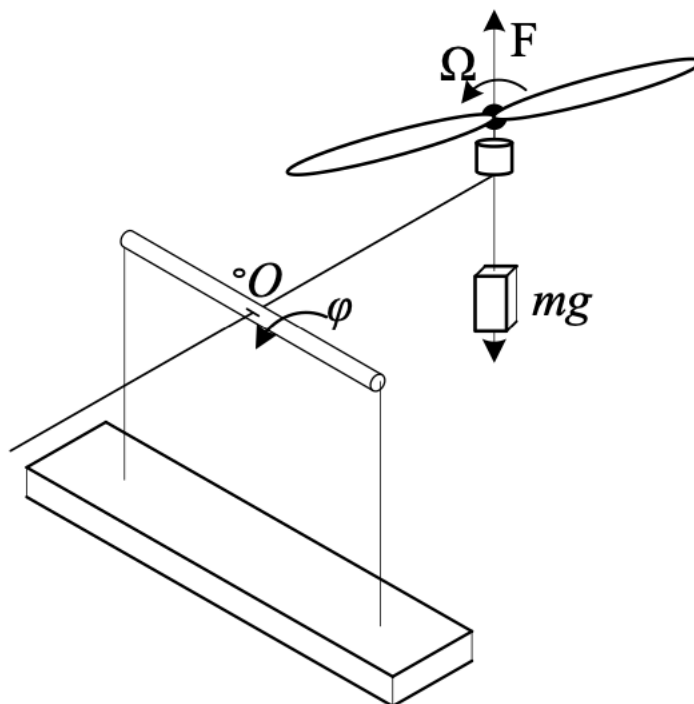


Рис. 2.3.1 Експериментальна установка

Для зняття тягових характеристик використовувалась експериментальна установка, зображена на рисунку 2.3.1. Експериментальна установка складається зі станини, рами, на якій закріплено роликівим з'єднанням плече з гвинтомоторною групою накінці. Безпосередньо під двигуном підвішено вантаж ( $mg$ ). Дані тягових зусиль знімалися при врівноважених плечах установки. В якості керуючого пристрою використовувався серійний транзисторний перетворювач, який забезпечує бездатчикове регулювання швидкості безколекторного двигуна постійного струму.



Сигнал завдання на швидкість формується за допомогою зміни ширини імпульсів ШІМ з частотою 50 Гц.

Результати експерименту представлені на рисунку 2.3.2. силовою характеристикою та графіком споживання струму залежно від навантаження. Для аеродинамічних параметрів використовуються аеродинамічні тунелі та сенсори тиску. Вимірювання підйомної сили, опору повітря та інших аеродинамічних параметрів проводяться з метою визначення оптимальної конфігурації корпусу для максимальної ефективності.

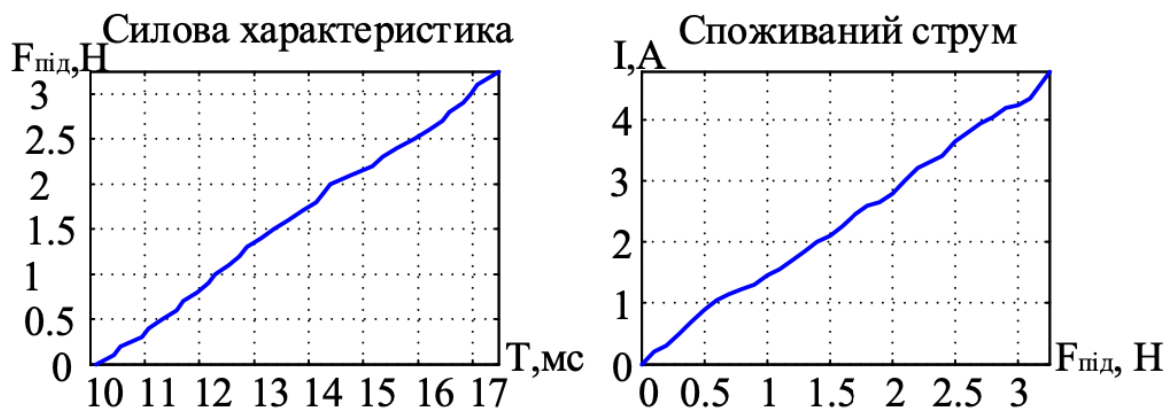


Рис. 2.3.2 Силовая характеристика та споживаний струм гвинтомоторної групи

Корисна маса, яку може підняти квадрокоптер може бути розрахована за формулою:

$$m_{\text{кор}} = 4 \cdot \frac{F_{\text{під}}}{g} - m_{\text{рама}} - m_{\text{АКБ}} - 4 \cdot m_{\text{ESC}} - m_{\text{contr}}$$

де  $F_{\text{під}}$  – підйомна сила гвинтомоторної групи;

$m_{\text{рама}}$  – маса рами квадрокоптера;

$m_{\text{АКБ}}$  – маса акумуляторної батареї;

$m_{\text{ESC}}$  – маса регулятора швидкості двигуна;

$m_{\text{contr}}$  – маса керуючого контролера;

$g$  – прискорення вільного падіння.

Для аеродинамічних параметрів використовуються аеродинамічні тунелі (див. рис. 2.3.3) та сенсори тиску. Вимірювання підйомної сили, опору повітря та інших аеродинамічних параметрів проводяться з метою визначення оптимальної конфігурації корпусу для максимальної ефективності.



*Рис. 2.3.3 Аеродинамічний тунель*

Параметри системи живлення визначаються через вимірювання потужності, напруги та робочого часу акумуляторів за допомогою спеціальних датчиків. Це необхідно для оцінки ефективності живлення БПЛА.

Вимірювання режимів роботи моторів здійснюється за допомогою датчиків обертового моменту та швидкості обертання. Ці дані використовуються для визначення оптимальних режимів роботи моторів для ефективного польоту.

Щодо електронної системи управління, вимірювання витрат енергії та швидкості обробки сигналів проводяться для отримання точних даних про роботу

електроніки. Використання спеціалізованих інструментів допомагає отримати об'єктивні результати.

Вимірювання параметрів коптерної схеми (як правило, мультироторних БПЛА, таких як квадрокоптери) включає оцінку ряду ключових характеристик, що впливають на продуктивність та стабільність польоту. Ось деякі з основних параметрів, які зазвичай вимірюються:

а) тяга гвинтів: вимірюється силою, яку генерують гвинти, зазвичай у ньютонках (Н). Це ключовий параметр, що визначає здатність коптера підніматися та підтримувати стабільний політ.

б) обертальний момент: важливий для розуміння навантаження на двигуни та електронний швидкісний контролер (ESC).

в) швидкість обертання гвинтів: вимірюється в обертах за хвилину (RPM). Висока швидкість обертання може підвищити тягу, але також збільшує споживання енергії.

г) енергоспоживання: вимірюється у ват-годинах (Вт•год) або ампер-годинах (А•год) та показує, скільки енергії споживає БПЛА під час польоту.

г) навантажувальна здатність: визначає, скільки ваги може підняти коптер, що є важливим для комерційних та дослідницьких застосувань.

д) кут нахилу лопатей гвинтів: впливає на аеродинамічну ефективність та тягу.

е) стабільність та точність контролю: часто вимірюється через тестування маневреності та відгук на команди управління.

є) акумуляторні характеристики: включають енергетичну щільність, напругу, струм та загальну тривалість життя батареї.

ж) аеродинамічні властивості: включають опір повітря та загальну ефективність дизайну.

з) вібрації та шум: це може бути важливим для деяких застосувань, особливо в населених місцях.

Ці параметри зазвичай вимірюються за допомогою спеціалізованого обладнання, такого як силувимірювальні динамометри, тахометри, аналізатори спектра, ватметри, і тестові стенди. Дані, отримані в результаті таких вимірювань,

використовуються для налаштування та оптимізації характеристик коптера, забезпечуючи кращу продуктивність та ефективність.

### 2.3.2 Збір та запис даних

Описуються процеси збору та фіксації даних під час вимірювань. Визначається, які параметри вимірюються в режимі реального часу, а які фіксуються для подальшого аналізу.

Для гвинтомоторної групи використовуються сенсори та датчики, що забезпечують точне вимірювання діаметра гвинтів, кута нахилу, швидкості обертання та обертового моменту. Аеродинамічні параметри, такі як підйомна сила та опір повітря, фіксуються за допомогою аеродинамічних тунелів та сенсорів тиску. Вимірювання параметрів системи живлення (потужність, напруга, струм, робочий час) здійснюються за допомогою спеціальних інструментів. Дані про режими роботи моторів, такі як обертовий момент та швидкість обертання, фіксуються в реальному часі на різних етапах польоту. Щодо електроніки, вимірювання витрат енергії та швидкості обробки сигналів здійснюються для отримання повної карти роботи електронної системи. Отримані дані записуються в електронному форматі для подальшого аналізу та використання в розробці методики оцінки енергоефективності коптерних схем БПЛА.

### 2.3.3 Методи аналізу даних

Надається огляд методів обробки та аналізу отриманих даних. Це може включати статистичні методи, регресійний аналіз, спектральний аналіз та інші техніки.

Статистичний аналіз дозволяє встановити середні значення, стандартні відхилення та інші статистичні параметри, щоб отримати узагальнену картину отриманих даних.

Графічний аналіз забезпечує візуалізацію залежностей між різними параметрами, сприяючи виявленню закономірностей та аномалій. Кореляційний аналіз допомагає визначити ступінь взаємозв'язку між різними параметрами, що важливо для розуміння системи.

Моделювання даних включає використання математичних та статистичних моделей для апроксимації даних та побудови прогнозів. Це сприяє створенню математичного відображення взаємозв'язків між параметрами.

Кластерний аналіз використовується для групування схожих за характеристиками даних, що може виявити групи, в яких параметри взаємодіють особливо ефективно або неефективно. Аналіз проводиться з метою виявлення закономірностей та ідентифікації факторів, що впливають на енергоефективність коптерної схеми.

#### 2.3.4 Валідація та контроль якості

Розглядається процедура валідації отриманих даних та забезпечення їхньої якості. Визначаються стандарти валідації, а також механізми контролю якості для уникнення помилок.

Валідація здійснюється за допомогою порівняння експериментальних даних з тими, що отримані з теоретичних розрахунків чи симуляційних моделей. В разі розбіжності виявляються можливі джерела помилок та невідповідностей.

Контроль якості охоплює систематичне слідкування за точністю вимірювань, функціонуванням обладнання та виконанням всіх етапів методики. Визначаються стандарти та критерії, які повинні бути досягнуті, а також забезпечуються процедури реагування на будь-які виявлені аномалії чи відхилення від заданих стандартів.

Валідація та контроль якості є важливими компонентами для забезпечення надійності та точності результатів, отриманих в процесі оцінки енергоефективності коптерних схем БПЛА.

Про сертифікацію: згідно з пунктом 4 розділу II Авіаційних правил, політ безпілотних повітряних суден з масою до 20 кг, включно, може бути виконаний без необхідності подавати заявки на використання повітряного простору без отримання дозволів на використання повітряного простору, без інформування відповідних державних органів. Відповідно до Авіаційних правил існує реєстр, де фіксуються всі БПЛА більше, ніж 25 кг [16].

Проте врегулювання потребує питання сертифікації та ліцензування таких БПЛА, які вже фіксуються в реєстрі. Безумовно, сертифікація БПЛА вимагає детального технічного огляду та перевірки їх відповідності встановленим нормам та стандартам щодо безпеки, надійності та ефективності. Це включає аналіз конструкції, систем управління, автопілотів, датчиків та інших складових частин БПЛА.

Ліцензування операторів БПЛА, зокрема тих, що використовують БПЛА в реєстрі з масою понад 25 кг, вимагає спеціальної документації та дотримання встановлених правил та обмежень. Також оператор повинен мати відповідну кваліфікацію та знання про безпекові аспекти польотів, правила використання БПЛА, процедури дозвільних режимів та інші вимоги, що регулюються компетентними органами. Крім того, класифікацію БПЛА потрібно узгодити з військовими та Наказом Міністерства оборони України № 661 «Правила виконання польотів безпілотними авіаційними комплексами державної авіації України» [1].

### 2.3.5. Інтеграція з математичними моделями

Описується як інтегрувати вимірювання та експериментальні дані з математичними моделями для отримання комплексної карти енергетичних характеристик.

Встановлюється взаємодія між отриманими експериментальними даними та розробленими математичними моделями. Цей етап є ключовим для забезпечення комплексного розуміння роботи коптерних схем та підвищення точності оцінки їхньої енергоефективності.

Отримані експериментальні дані використовуються для валідації математичних моделей, а також для уточнення та оптимізації параметрів цих моделей. Інтеграція з математичними моделями дозволяє враховувати та пояснювати складні взаємодії між різними компонентами коптерної схеми, що може бути складно або неможливо досягти лише за допомогою експериментів.

Цей підхід дозволяє піднятися на рівень абстракції та генералізації, щоб розглядати коптерні схеми в рамках математичних моделей, враховуючи при цьому

реальні умови та характеристики. Інтеграція з математичними моделями є важливим етапом у вдосконаленні та розширенні розуміння процесів, які відбуваються у коптерних схемах, що допомагає забезпечити більш точні та адаптивні методи оцінки їхньої енергоефективності.

Цей підрозділ надає чіткі кроки та методологію для проведення вимірювань та аналізу даних, які дозволяють здійснити об'єктивну та надійну оцінку енергоефективності коптерних схем БпЛА.

## **Висновок до розділу 2**

Розділ 2 роботи «Методика оцінки енергоефективності коптерних схем БпЛА» висвітлює розроблену методику для оцінки енергоефективності коптерних схем безпілотних літальних апаратів (БпЛА). Процедури вимірювань та аналізу даних, описані в цьому розділі, надають конкретний та систематичний підхід до отримання об'єктивних результатів, необхідних для подальшого удосконалення енергоефективності БпЛА.

Розроблена методика дозволяє параметризувати коптерні схеми та визначати їхні ключові характеристики. Математичні моделі, які враховують аеродинамічні та енергетичні аспекти, надають можливість прогнозувати роботу БпЛА в різних режимах польоту.

Процедури вимірювань, збору даних та їхнього аналізу включають в себе методи валідації та контролю якості, щоб гарантувати надійність отриманих результатів. Інтеграція з математичними моделями сприяє отриманню комплексного розуміння енергетичних аспектів коптерних схем.

Висновки розділу формують фундамент для подальших досліджень та розробок, спрямованих на покращення енергоефективності БпЛА. Отримані результати відіграють ключову роль у формуванні стратегій оптимізації та рекомендацій для реального використання БпЛА з метою максимально ефективного та стійкого функціонування.

## РОЗДІЛ 3

### ПІДБІР ГВИНТОМОТОРНОЇ ГРУПИ

#### 3.1 Аналіз варіантів гвинтомоторних систем

У розділі "Аналіз варіантів гвинтомоторних систем" проводиться комплексний аналіз різних конфігурацій та варіантів гвинтомоторних систем, зокрема, тих, які можуть бути використані у коптерних схемах БпЛА. Аналіз охоплює різні параметри та характеристики, які визначають ефективність, надійність та інші ключові аспекти роботи гвинтомоторних систем.

Оцінка варіантів включає вивчення основних характеристик таких систем, включаючи, але не обмежуючись, тягу, коефіцієнт потужності, вагу, розміри, швидкість обертання, інтеграцію з іншими елементами коптерної схеми та інші фактори, які можуть впливати на енергоефективність.

Крім того, розглядаються переваги та недоліки різних гвинтомоторних систем з точки зору їхнього застосування у конкретних умовах. Здійснюється порівняльний аналіз та вибір оптимальних варіантів для використання у коптерних схемах.

Аналіз варіантів гвинтомоторних систем є важливим етапом у розробці ефективних та оптимальних конфігурацій для подальшого використання у безпілотних літальних апаратах.

#### 3.2 Критерії та методика вибору оптимальної гвинтомоторної групи

У розділі "Критерії та методика вибору оптимальної гвинтомоторної групи" розглядаються ключові критерії та методика, що використовуються для визначення оптимальної гвинтомоторної групи для коптерних схем БпЛА.

Критерії вибору включають:



а) енергоефективність: оцінка витрат енергії та коефіцієнтів потужності для різних гвинтомоторних систем.

б) тяга: визначення максимальної тяги, яку може забезпечити гвинтомоторна група.

в) маса: вага гвинтомоторної групи, яка впливає на загальну масу коптера.

г) розміри: габаритні розміри гвинтомоторної групи, що враховуються при конструюванні коптера.

д) надійність: оцінка стійкості та надійності роботи гвинтомоторної системи.

е) вартість: економічні аспекти виробництва та експлуатації гвинтомоторної групи.

Методика вибору:

а) математичне моделювання: використання математичних моделей для прогнозування роботи гвинтомоторних систем за різних умов.

б) експериментальні дослідження: проведення фізичних експериментів для отримання реальних даних та валідації математичних моделей.

в) аналіз чутливості: визначення впливу змін параметрів гвинтомоторної групи на різні критерії та вибір оптимальних значень.

г) багатокритеріальний аналіз: врахування комплексу критеріїв та використання методів оптимізації для визначення оптимальної гвинтомоторної групи.

Цей розділ допомагає систематизувати та обґрунтувати вибір гвинтомоторної групи для досягнення найкращої ефективності та відповідності вимогам конкретної задачі.

### **3.3 Порівняння та оцінка різних конфігурацій гвинтомоторів**

У розділі "Порівняння та оцінка різних конфігурацій гвинтомоторів" проводиться об'єктивне порівняння різних варіантів гвинтомоторних систем для коптерних схем БПЛА.

**Етапи порівняння та оцінки включають:**

а) аналіз технічних характеристик: детальний огляд технічних параметрів кожної гвинтомоторної системи, таких як тяга, потужність, маса, розміри, швидкість обертання тощо.

Одним із виробників гвинтомоторних систем є T-MOTOR, який пропонує ряд продуктів, спеціально розроблених для використання в сільському господарстві. Наприклад, їхня модель P60 забезпечує тягу до 8 кг (див. рис. 3.3.1), а модель P80 — понад 17 кг тяги (див. рис. 3.3.2 та рис. 3.3.3 ). Ці системи відрізняються високою ефективністю та продуктивністю, при цьому маючи захист від пилу та води, що робить їх ідеальними для використання в сільськогосподарських умовах. Ключовими характеристиками цих систем є висока тяга і довговічність, забезпечуючи надійну роботу в різних умовах.

Важливо відзначити, що для точного вибору гвинтомоторної системи для конкретного агродрона необхідно враховувати такі параметри, як необхідна тяга, вага системи, розміри, швидкість обертання гвинтів та загальна потужність системи. Ці параметри визначаються на основі вимог до конкретного застосування та умов експлуатації дрона.

## P60 SETUP REFERENCE

Motor	P60-KV340	P60-KV340	P60-KV170	P60-KV170
CF prop	P22*6.6CF	P22*6.6CF	P22*6.6CF	P22*6.6CF
ESC	Flame 60A HV	Flame 60A HV	Flame 60A HV	Flame 60A HV
Voltage	6S	6S	12S	12S
Battery	22Ah	22Ah	22Ah*2	22Ah*2
AUW	Quad/10-15KG	Hexa/20-25KG	Quad/18-22KG	Hexa/25-30KG
Flight Time	14-24mins	8-11mins	22-33mins	15-18mins



P60+P22\*6.6+Flame 60A HV

Max thrust: 6.8KG@6S , 8.5KG@12S

Load Testing Data									
Ambient Temperature			18°C		Voltage			DC Power Supplier	
Item No.	Voltage (V)	Prop	Throttle	Current (A)	Power (W)	Thrust (G)	RPM	Efficiency (G/W)	Operating Temperature (°C)
P60 KV170	48	T-motor 20*6CF	50%	5.4	259.20	2116	4152	8.16	55
			55%	6.4	307.20	2371	4425	7.72	
			60%	7.7	369.60	2762	4709	7.47	
			65%	9.3	446.40	3125	5014	7.00	
			75%	13.2	633.60	4002	5626	6.32	
			85%	17.3	830.40	4821	6177	5.81	
			100%	25.4	1219.20	6246	6992	5.12	
		T-motor 22*6.6CF	50%	6.6	316.8	2801	3703	8.84	85
			55%	8.6	412.8	3312	4005	8.02	
			60%	9.9	475.2	3763	4289	7.92	
			65%	12.4	595.2	4356	4575	7.32	
			75%	17.1	820.8	5372	5091	6.54	
			85%	23.2	1113.6	6582	5635	5.91	
			100%	34	1632	8414	6374	5.16	

Рис. 3.3.1 ТТХ та таблиця тестування двигуна P60

## P80III SETUP REFERENCE

Motor	P80III-KV100	P80III-KV100	P80III-KV120	P80III-KV120
CF prop	30*10.5CF	30*10.5CF	30*10.5CF	30*10.5CF
ESC	Flame80A HV	Flame80A HV	Flame80A HV	Flame80A HV
Voltage(Lipo)	12S	12S	12S	12S
Battery(Lipo)	22000mAh	44000mAh	22000mAh	44000mAh
AUW	Quad/25KG	Hexa/30KG	Quad/30KG	Hexa/35KG
Flight Time	10-20mins	30-40mins	10-15mins	25-30mins
Payload	Quad/10KG	Hexa/10KG	Quad/15KG	Hexa/15KG



P80III + Flame80A HV + G30\*10.5Carbon fiber prop

Max thrust: 17KG@12S

*Рис. 3.3.2 ТТХ двигуна P80*

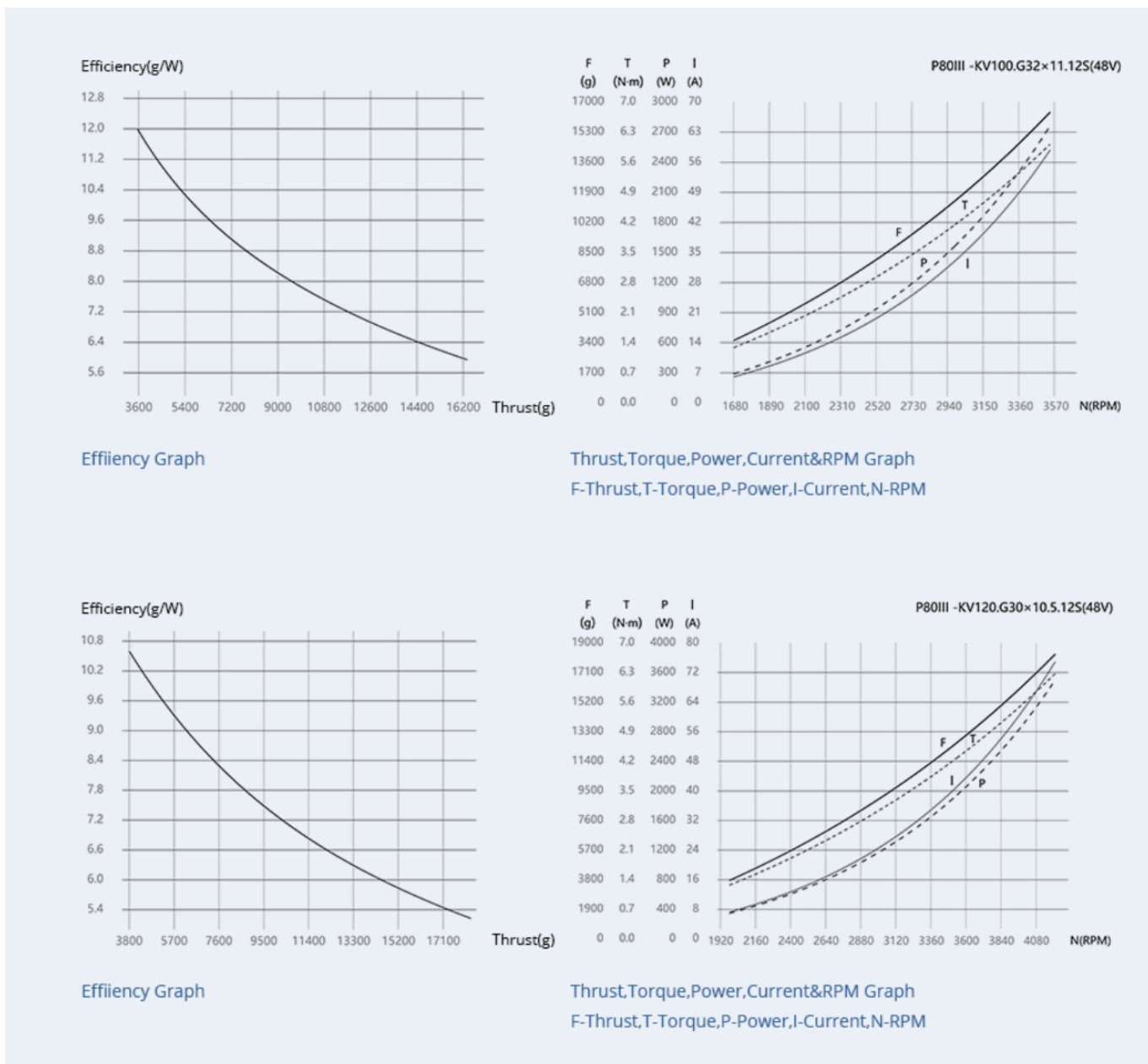


Рис. 3.3.3 Графіки тестування двигуна P80

б) оцінка енергоефективності: вивчення витрат енергії та коефіцієнтів потужності для кожної конфігурації гвинтомоторів.

в) надійність та довговічність: оцінка ступеня надійності та тривалості служби гвинтомоторних систем.

г) вартість: аналіз економічних аспектів, включаючи вартість виробництва, обслуговування та ремонту.

г) сумісність з коптерною схемою: перевірка сумісності обраної гвинтомоторної системи з конкретною коптерною схемою, враховуючи фізичні та технічні обмеження.

д) аналіз робочих умов: врахування особливостей робочих умов, таких як кліматичні умови, висота польоту, тип місії.

е) безпека та стандарти: перевірка відповідності систем стандартам безпеки та встановленим нормам.

є) врахування факторів інтеграції: оцінка легкості інтеграції гвинтомоторних систем у коптерну схему, враховуючи аспекти сумісності та монтажу.

ж) багатокритеріальний аналіз: використання методів багатокритеріальної оптимізації для визначення найкращого варіанту гвинтомоторної системи з урахуванням всіх аспектів.

Цей розділ надає повний огляд різних конфігурацій гвинтомоторних систем і визначає оптимальний варіант для подальшого використання в контексті коптерних схем БпЛА.

### **Висновок до розділу 3**

В розділі 3 було проведено вичерпний аналіз гвинтомоторних систем для коптерних схем БпЛА. Різноманітні варіанти були об'єктивно порівняні та оцінені з точки зору технічних, функціональних та економічних параметрів.

На основі проведеного дослідження можна зробити наступні висновки:

а) енергоефективність: деякі конфігурації гвинтомоторних систем виявилися більш енергоефективними, що робить їх привабливими для застосування в безпілотних літальних апаратах.

б) технічні характеристики: різні конфігурації мають свої унікальні технічні характеристики, і вибір повинен базуватися на конкретних вимогах та умовах застосування.

в) надійність: оцінка надійності показала, що певні гвинтомоторні системи володіють високим рівнем стійкості та міцності.

г) вартість: економічний аспект виявився важливим фактором, і вибір гвинтомоторної системи повинен бути сбалансованим з точки зору вартості та ефективності.

г) адаптабельність: врахування різноманітних умов роботи та адаптабельність до різних завдань є ключовими критеріями вибору.

Враховуючи ці аспекти, можна визначити оптимальні гвинтомоторні системи, які найкращим чином відповідають конкретним потребам та умовам використання в безпілотних літальних апаратах. Подальші дослідження та розробки повинні спрямовуватися на удосконалення вибраних конфігурацій та розробку нових технологічних рішень для підвищення загальної ефективності систем.

## РОЗДІЛ 4. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ

### 4.1 Опис методики проведення експерименту

У розділі 4.1 "Опис методики проведення експерименту" детально розглядається стратегія та процедура, які використовуються для збору даних та проведення експериментальних досліджень з метою оцінки енергоефективності коптерних схем БпЛА. Опис методики включає наступні етапи:

*а) визначення цілей експерименту:* чітке формулювання цілей, які включають в себе конкретні аспекти енергоефективності, що плануються досліджувати. Визначення цілей експерименту є критичним етапом у науковому дослідженні.

1) оцінка впливу конфігурації гвинтомоторної системи: визначити, як різні конфігурації гвинтомоторних систем впливають на загальну енергоефективність коптерної схеми.

Для цього візьмемо декілька гвинтів різних конфігурацій фірми Gemfan та протестуємо на стенді (див. рис. 4.1.1). Будемо заміряти тягу та скільки в цей момент двигун споживає енергії. Тестувати будемо 3 гвинти:

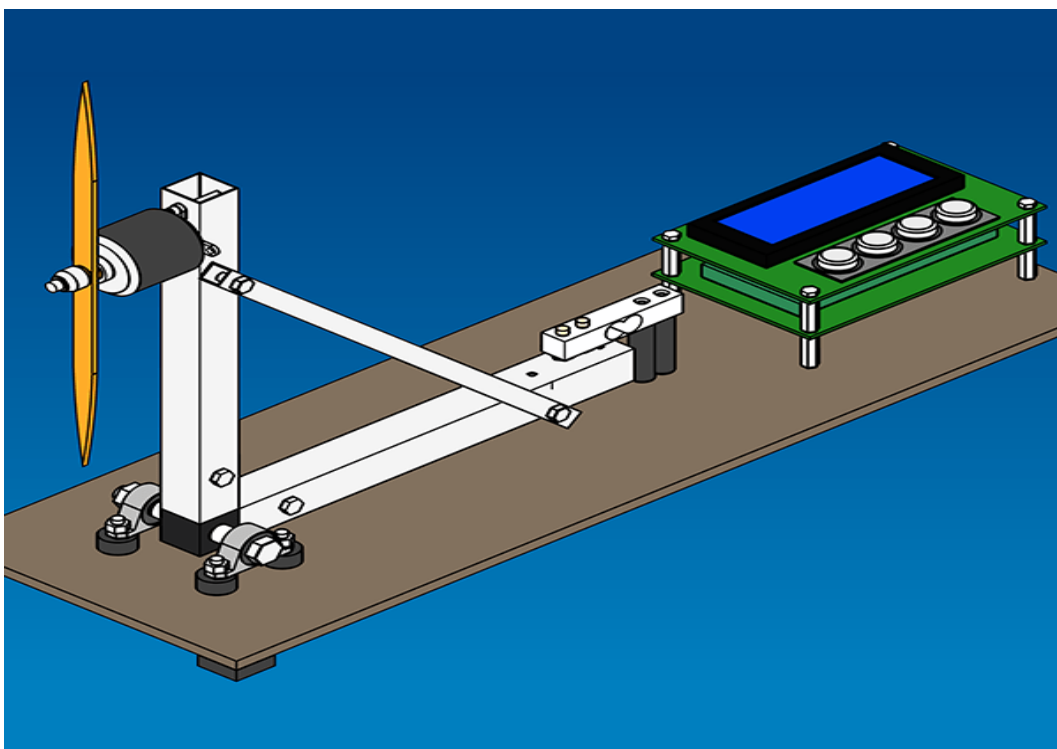
а) Gemfan5144 (рис. 4.1.2);

б) Gemfan51466 (рис. 4.1.3);

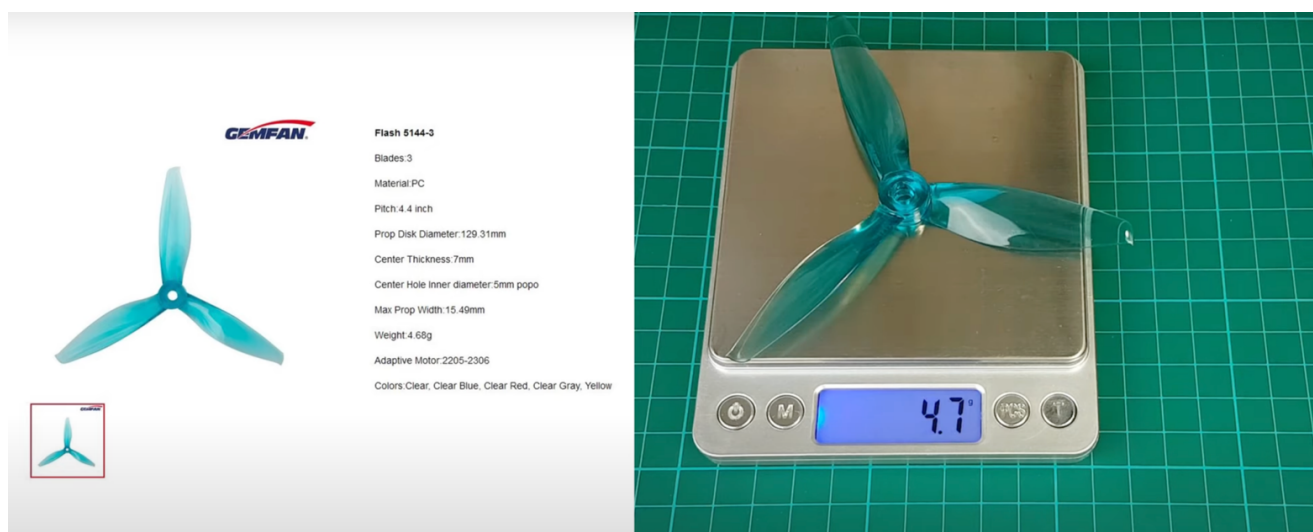
в) Gemfan51499 (рис. 4.1.4).

Де – перші дві цифри – діаметр гвинта в дюймах (у нашому випадку в усіх гвинтів діаметр 5.1 дюйми), решта цифр відповідає за характеристику нахилу лопаток (також в дюймах).

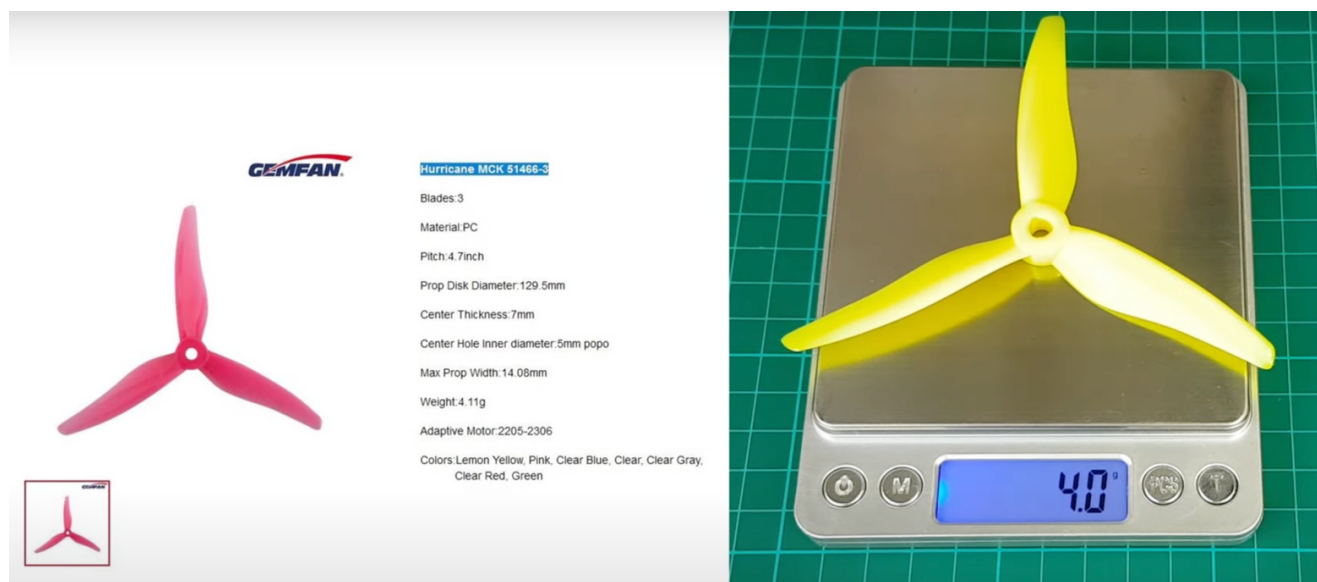




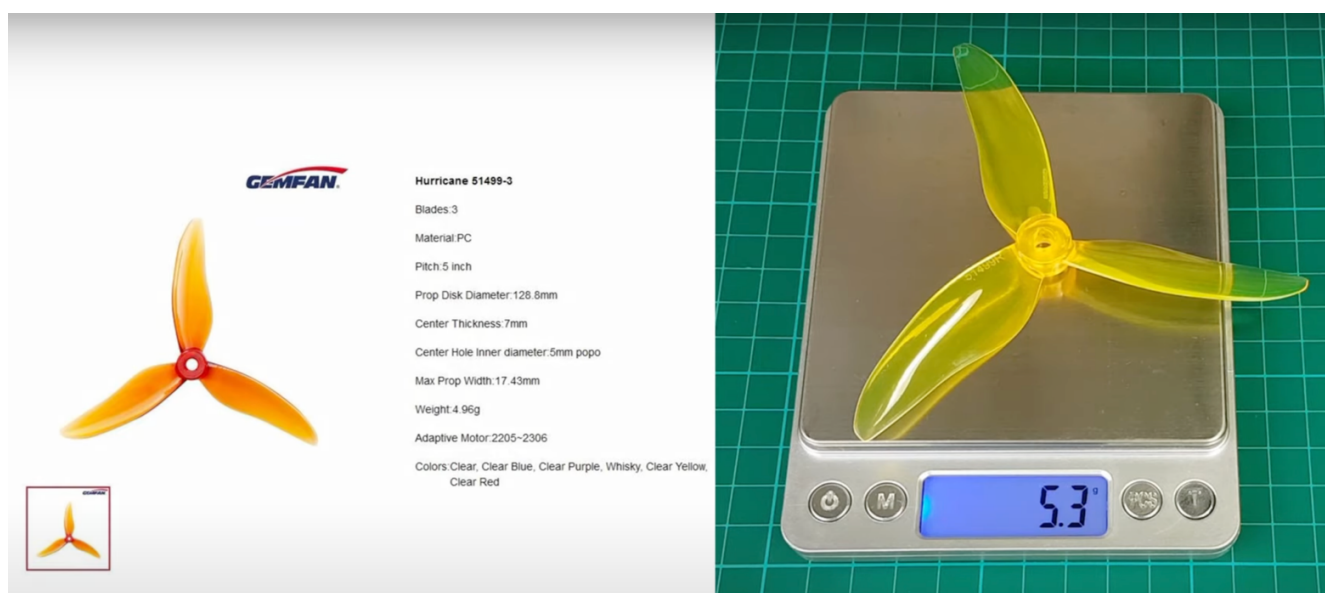
*Рис. 4.1.1 Схематичне зображення тестового стенду тяги*



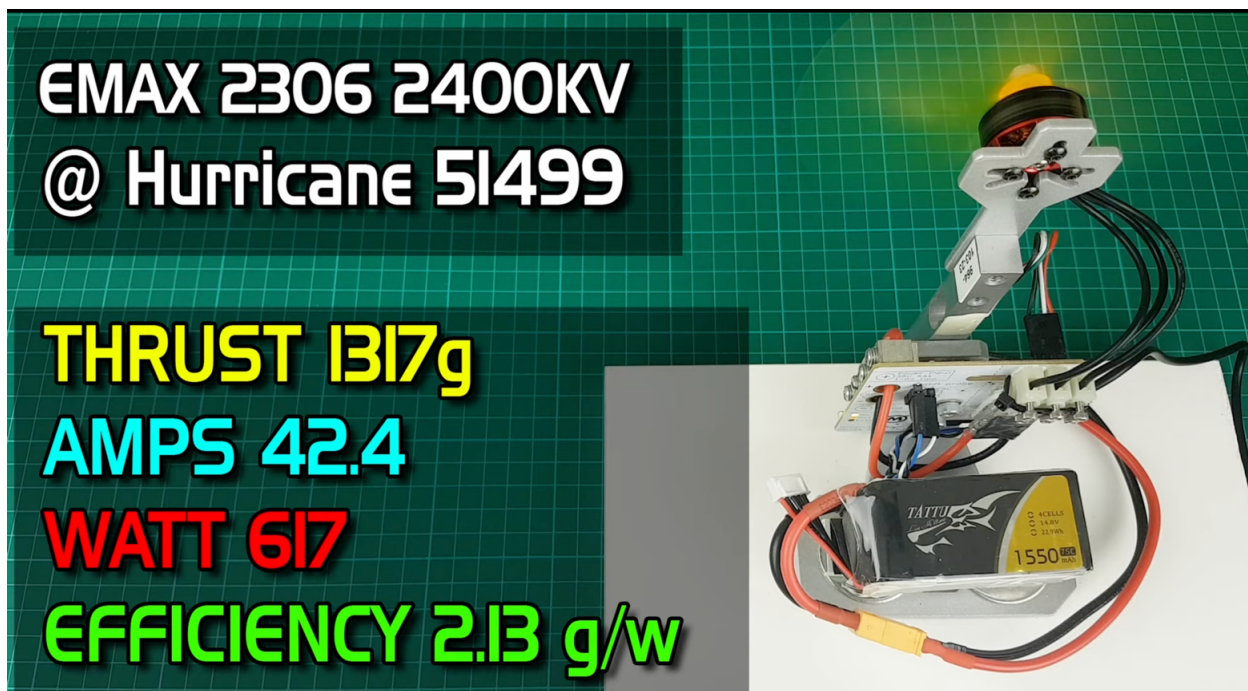
*Рис. 4.1.2 TTX Gemfan 5144*



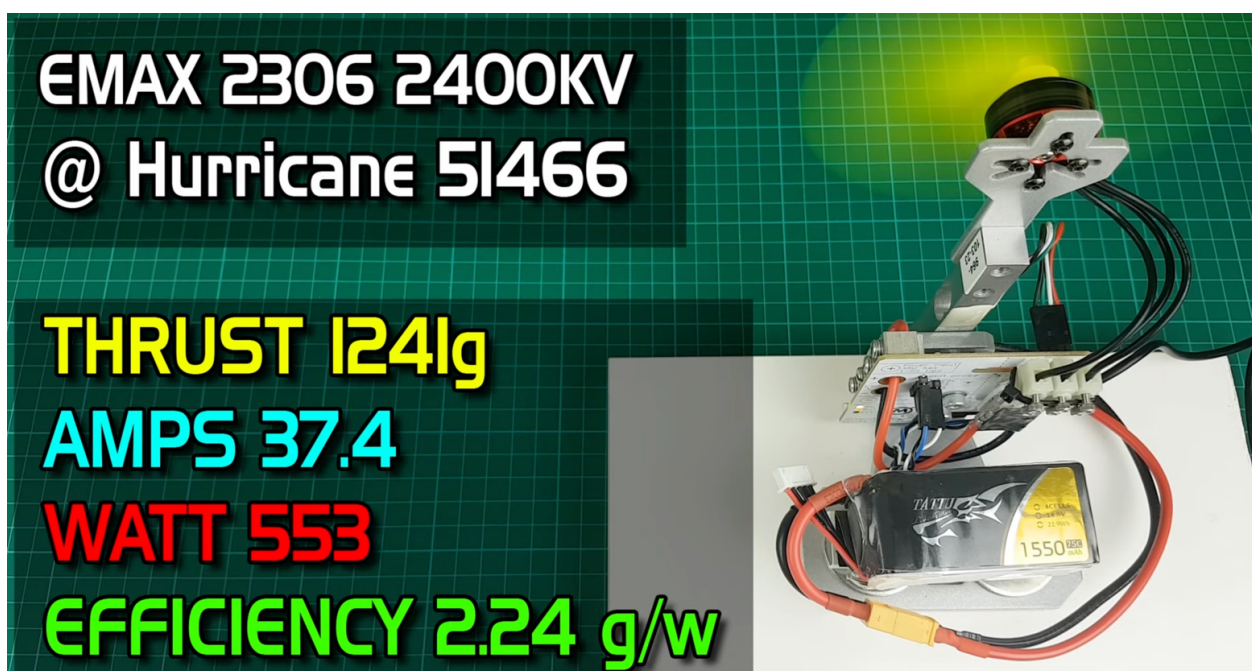
*Puc. 4.1.3 TTX Gemfan 51466*



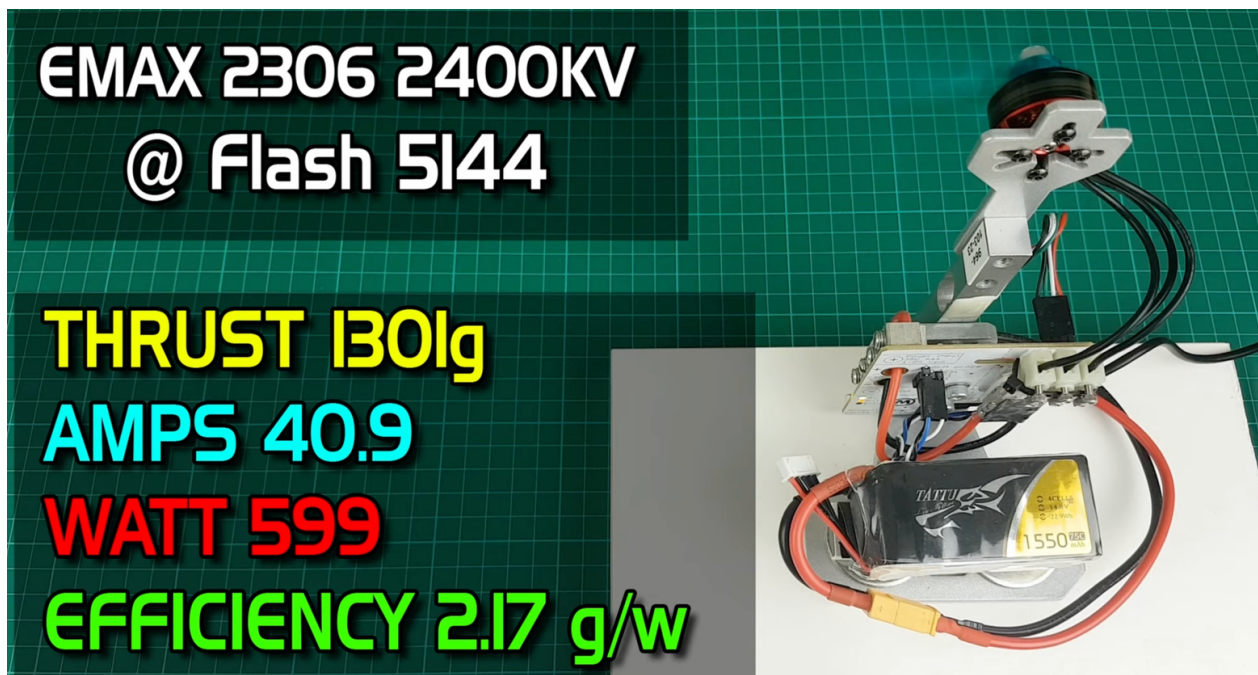
*Puc. 4.1.4 TTX Gemfan 51499*



*Рис. 4.1.5 Тестування гвинта Getfan 5144*



*рис. 4.1.6 Тестування гвинта Getfan 51466*



*Рис. 4.1.7 Тестування гвинта Gemfan 51499*

Тепер запишемо отримані дані (рис. 4.1.5, рис. 4.1.6 та рис. 4.1.7) до порівняльної таблиці (див. рис. 4.1.8).

	ESC signal (%)	Thrust (gf)	Current (A)	Power (W)	Efficiency (gf/W)
GemFan Flash 5144-3	50%	422,68	8,45	1379	3,06
	80%	1003,49	26,89	414,39	2,42
	100%	1301	40,9	599,47	2,17
GemFan Hurricane MCK 51466-3	50%	386,49	7,69	125,06	3,09
	80%	939,37	24,24	375,22	2,5
	100%	1241,48	37,43	553,24	2,24
GemFan Hurricane 51499-3	50%	431,22	8,86	143,08	3,01
	80%	1024,82	28,26	431,4	2,37
	100%	1317,47	42,47	617,03	2,13

*Рис. 4.1.8 Порівняльна таблиця отриманих результатів*

2) вивчення залежності між типами моторів та енергоспоживанням: встановити залежність між типами моторів, їх робочими режимами та витратою енергії під час різних маневрів. Розглянемо на прикладі двох моторів від компанії Hobbywing. XRotor X9 PLUS технічні параметри зображено на рис. 4.1.8 та XRotor X9 технічні параметри – на рис. 4.1.9.

## Technical Parameters:

Voltage(V)	Propeller	Throttle (%)	Thrust(g)	Current(A)	Power(W)	Speed(RPM)	Efficiency(g/W)
46V LiPo	HW 36*19Inch Foldable Propeller	40%	5460	9.5	509.3	1897	10.7
		42%	5915	10.7	573.2	1973	10.3
		44%	6405	12.0	646.3	2053	9.9
		46%	7045	13.9	747.6	2152	9.4
		48%	7780	16.2	870.9	2261	8.9
		50%	8405	18.3	980.8	2350	8.6
		52%	9180	20.9	1122.9	2454	8.2
		54%	9820	23.2	1244.5	2537	7.9
		56%	10045	24.0	1288.2	2565	7.8
		58%	11000	27.5	1478.5	2680	7.4
		60%	11165	28.2	1512.1	2699	7.4
		62%	12395	33.0	1771.2	2836	7.0
		64%	13060	35.7	1917.5	2906	6.8
		66%	13825	39.0	2091.9	2983	6.6
		68%	14790	43.3	2322.3	3076	6.4
		70%	16150	49.8	2670.5	3198	6.0
		72%	17080	54.6	2927.3	3276	5.8
		74%	17855	58.8	3154.6	3338	5.7
		76%	18880	64.8	3476.3	3418	5.4
		78%	19800	70.6	3787.6	3487	5.2
80%	21340	81.4	4362.8	3600	4.9		
100%	22535	90.6	4860.2	3688	4.6		

*Рис. 4.1.8 XRotor X9 PLUS технічні параметри ефективності*

X9-3411 Technical Parameters:

Voltage(V)	Propeller	Throttle (%)	Thrust(g)	Current(A)	Power(W)	Speed(RPM)	Efficiency(g/W)
46V (12S LiPo)	HW 34 Inch Foldable Propeller	40%	5,005	9.6	444.2	1763	11.27
		45%	5,998	12.8	591.5	1946	10.14
		50%	7,248	17.0	789.4	2139	9.18
		52%	7,923	19.1	885.0	2218	8.95
		54%	8,495	21.2	982.8	2287	8.64
		56%	9,018	23.7	1094.8	2372	8.24
		58%	9,498	25.5	1183.8	2432	8.02
		60%	10,143	28.0	1301.2	2515	7.80
		62%	10,769	30.6	1422.9	2590	7.57
		64%	11,493	34.2	1578.6	2671	7.28
		66%	12,136	37.1	1716.7	2738	7.07
		68%	13,004	41.0	1896.7	2818	6.86
		70%	13,646	44.1	2048.1	2889	6.66
		75%	15,198	53.5	2470.0	3075	6.15
		80%	17,500	66.4	3073.1	3271	5.69
		90%	21,553	94.6	4373.8	3636	4.93
100%	22,994	100.8	4790.4	3697	4.80		

Рис. 4.1.9 XRotor X9 технічні параметри ефективності

Аналізуючи дані з цих двох таблиць (рис. 4.1.8 та рис. 4.1.9), беремо до уваги ключовий параметр – тягу (g), двигун X9 plus видає 10045г тяги при споживанні – 1288.2W. Менший за розмірами двигун X9 видає 10143г тяги при споживанні – 1301.2W. Різниця в ефективності 1% не є настільки суттєвою, проте вже з цього можемо зробити висновок: якщо будемо збільшувати розміри гвинта та зменшувати швидкість обертів – ефективність g/W буде покращуватись. Разом з ефективністю буде збільшуватись запас потужності відносно маси, що дозволить збільшити масу корисного навантаження, не жертвуючи часом польоту.

3) визначення впливу аеродинамічних параметрів: дослідити, як аеродинамічні характеристики, такі як форма лопастей, можуть впливати на енергоефективність коптера.

Проаналізувавши експериментальні тести тяги (рис. 4.1.5, рис. 4.1.6, рис. 4.1.7) впливає, що зі збільшенням кута нахилу лопаті – збільшується максимальна тяга, проте – ефективність споживання енергії погіршується.

4) аналіз впливу зовнішніх факторів: вивчити, як зовнішні фактори, такі як швидкість вітру чи температурні зміни, можуть впливати на роботу гвинтомоторної групи та, відповідно, на енергоспоживання.

5) оцінка стійкості та надійності роботи системи: визначити, наскільки стійкою та надійною є гвинтомоторна система в різних умовах роботи.

Ці чіткі цілі дозволять систематизувати експеримент та забезпечити важливий фреймворк для аналізу результатів.

**б) вибір об'єкта та параметрів дослідження:** визначення конкретних коптерних схем, що будуть використовуватися в експериментах, та параметрів, які підлягатимуть вимірюванню.

#### **Коптерні схеми БпЛА:**

1) quadcopter (квадрокоптер): класична схема із чотирма гвинтами, розташованими на кожному з кутів коптера.

2) hexacopter (гексакоптер): схема із шістьма гвинтами для додаткового навантаження та стійкості.

3) octocopter (октокоптер): схема із восьми гвинтами, що надає ще більше підйому та стійкості.

#### **Параметри для вимірювань:**

1) тяга (thrust): сила, яку створюють гвинти для утримання коптера в повітрі. Вимірюється в Ньютонах або грамах.

2) витрата енергії (energy consumption): кількість електроенергії, використаної для підтримки польоту протягом певного часу. Вимірюється у ватт-годинах.

3) швидкість обертання гвинтів (rotational speed of propellers): число обертів гвинтів в хвилину.

4) температура моторів (motor temperature): температура, яку сягають мотори під час роботи. Вимірюється у градусах Цельсія.

5) маса (weight): загальна маса коптера, включаючи обладнання та пальблоки.

6) аеродинамічні параметри (aerodynamic characteristics): визначення характеристик аеродинамічної ефективності, таких як ліфтова та тягова сили.

7) режими роботи моторів (motor operation modes): аналіз різних режимів роботи моторів, зокрема, тягового та режиму підтримки польоту.

Ці параметри дозволять вам детально оцінити енергоефективність коптерних схем у різних умовах та конфігураціях.

**в) розробка експериментального стенду:** створення або використання вже існуючого експериментального стенду, на якому будуть проводитися дослідження.

**г) вимірювання та збір даних:** установлення вимірювального обладнання для отримання даних про енергоефективність, включаючи тягу, витрату енергії, температуру, швидкість обертання гвинтів та інші параметри.

**г) контроль зовнішніх впливів:** мінімізація або контроль впливу зовнішніх факторів, таких як погодні умови чи інші можливі джерела спотворень результатів.

**д) визначення методів обробки та аналізу даних:** розробка методів обробки та аналізу отриманих даних для отримання об'єктивних та надійних результатів.

**е) проведення серії експериментів:** проведення повторюваних експериментів для підтвердження стабільності та достовірності отриманих результатів.

**є) визначення обсягу та тривалості експерименту:** визначення періоду часу та кількості експериментів для отримання достатньої статистичної обробки результатів.



*ж) етичні аспекти:* врахування та дотримання етичних стандартів у проведенні дослідження.

Описана методика надає чіткий та систематизований план для проведення експериментів, спрямованих на дослідження енергоефективності коптерних схем БпЛА.

## **4.2 Вимірювання параметрів та збір даних**

У розділі 4.2 "Вимірювання параметрів та збір даних" описується конкретний процес вимірювання та збору даних, який використовується у проведенні експерименту з оцінки енергоефективності коптерних схем БпЛА. Основні етапи цього процесу включають:

а) визначення параметрів для вимірювань: чітка ідентифікація параметрів, які будуть вимірюватися, таких як тяга, витрата енергії, оберти гвинтів, температура, маса та інші.

б) вибір вимірювального обладнання: визначення та обрання вимірювальних приладів та сенсорів для вимірювання визначених параметрів.

в) калібрування приладів: проведення калібрування вимірювального обладнання для забезпечення точності та надійності отриманих даних.

г) монтаж сенсорів: утановка сенсорів та вимірювальних пристроїв на коптерну схему так, щоб вони точно вимірювали обрані параметри.

г) програмування даних: розробка програмного забезпечення для автоматичного вимірювання, збору та запису даних в режимі реального часу.

д) контроль та синхронізація: забезпечення контролю та синхронізації всіх вимірювальних пристроїв для уникнення помилок та забезпечення узгоджених результатів.

е) старт та зупинка експерименту: організація старту та зупинки експерименту з урахуванням всіх технічних та безпекових аспектів.

е) контроль якості даних: періодичний аналіз та перевірка отриманих даних для забезпечення їхньої якості та достовірності.

ж) реєстрація зовнішніх факторів: збір інформації про можливі впливи зовнішніх факторів, які можуть впливати на результати експерименту.

Цей розділ дозволяє систематизувати та деталізувати процес вимірювання та збору даних, забезпечуючи прозорість та обґрунтованість методології експерименту.

### **4.3 Аналіз отриманих результатів**

У розділі 4.3 "Аналіз отриманих результатів" проводиться докладний розгляд отриманих даних з експерименту з оцінки енергоефективності коптерних схем БпЛА. Основні етапи цього аналізу включають:

а) очистка та обробка даних: видалення аномалій, помилок та забруднень у даних. Проведення необхідних обчислень та перетворень для підготовки даних до подальшого аналізу.

б) статистичний аналіз: використання методів статистичного аналізу для визначення основних статистичних характеристик, таких як середнє значення, дисперсія, стандартне відхилення тощо.

в) графічне представлення результатів: використання графіків, діаграм та інших візуальних засобів для наочного представлення отриманих результатів.

г) інтерпретація та висновки: зрозуміння та інтерпретація знайдених закономірностей, тенденцій та аномалій у вибірці.

г) порівняння з очікуваними результатами: порівняння отриманих результатів з очікуваними або попередніми даними з літературних джерел або теоретичних моделей.

д) статистична вагомість результатів: визначення статистичної значущості та вагомості отриманих результатів.

е) ідентифікація тенденцій та рекомендації: виділення головних тенденцій та розробка рекомендацій для подальших кроків дослідження або практичного використання.

## Експеримент

*а) визначення цілей експерименту:*

1) Дослідити енергоефективність БПЛА Surpriser

*б) вибір об'єкта та параметрів дослідження:*

1) назва: БПЛА Surpriser (рис 4.3.1)



*Рис 4.3.1 БПЛА Surpriser*

2) тип: квадрокоптер

3) двигуни: електро – HobbyWing Xrotor X9

4) гвинт: HobbyWing 3411

5) параметри:

а) тяга (thrust): сила, яку створюють гвинти для утримання коптера в повітрі. Вимірюється в Ньютонах або грамах.

б) витрата енергії (energy consumption): кількість електроенергії, використаної для підтримки польоту протягом певного часу. Вимірюється у ватт-годинах.

в) швидкість обертання гвинтів (rotational speed of propellers): число обертів гвинтів в хвилину.

г) температура моторів (motor temperature): температура, яку сягають мотори під час роботи. Вимірюється у градусах Цельсія.

е) маса (weight): загальна маса коптера, включаючи обладнання та АКБ.

**в) вимірювання та збір даних:**

1) На сайті виробника беремо таблицю залежностей параметрів на різних положеннях “дросельної заслінки”(рис. 4.3.2) [17].

X9-3411 Technical Parameters:

Voltage(V)	Propeller	Throttle (%)	Thrust(g)	Current(A)	Power(W)	Speed(RPM)	Efficiency(g/W)
46V (12S LiPo)	HW 34 Inch Foldable Propeller	40%	5,005	9.6	444.2	1763	11.27
		45%	5,998	12.8	591.5	1946	10.14
		50%	7,248	17.0	789.4	2139	9.18
		52%	7,923	19.1	885.0	2218	8.95
		54%	8,495	21.2	982.8	2287	8.64
		56%	9,018	23.7	1094.8	2372	8.24
		58%	9,498	25.5	1183.8	2432	8.02
		60%	10,143	28.0	1301.2	2515	7.80
		62%	10,769	30.6	1422.9	2590	7.57
		64%	11,493	34.2	1578.6	2671	7.28
		66%	12,136	37.1	1716.7	2738	7.07
		68%	13,004	41.0	1896.7	2818	6.86
		70%	13,646	44.1	2048.1	2889	6.66
		75%	15,198	53.5	2470.0	3075	6.15
		80%	17,500	66.4	3073.1	3271	5.69
		90%	21,553	94.6	4373.8	3636	4.93
100%	22,994	100.8	4790.4	3697	4.80		

*Рис. 4.3.2 Таблиця залежностей параметрів двигуна HobbyWing X9 в парі з гвинтом 3411 на різних положеннях “дросельної заслінки”.*

2) проводимо зважування БПЛА Surpriser та акумуляторів 44,4V та 44A/h  
БПЛА – 11кг, АКБ – 8кг, корисне навантаження (камера) – 1кг.

Загальна маса –20кг.

3) підіймаємо БПЛА Surpriser у повітря та за допомогою внутрішнього датчика струму заміряємо активне споживання у стані зависання над точкою

(вітер 4 м/с, температура 2°C). Телеметрію з показниками датчиків у реальному часі виводимо на екран пульта керування. (Рис. 4.3.3)

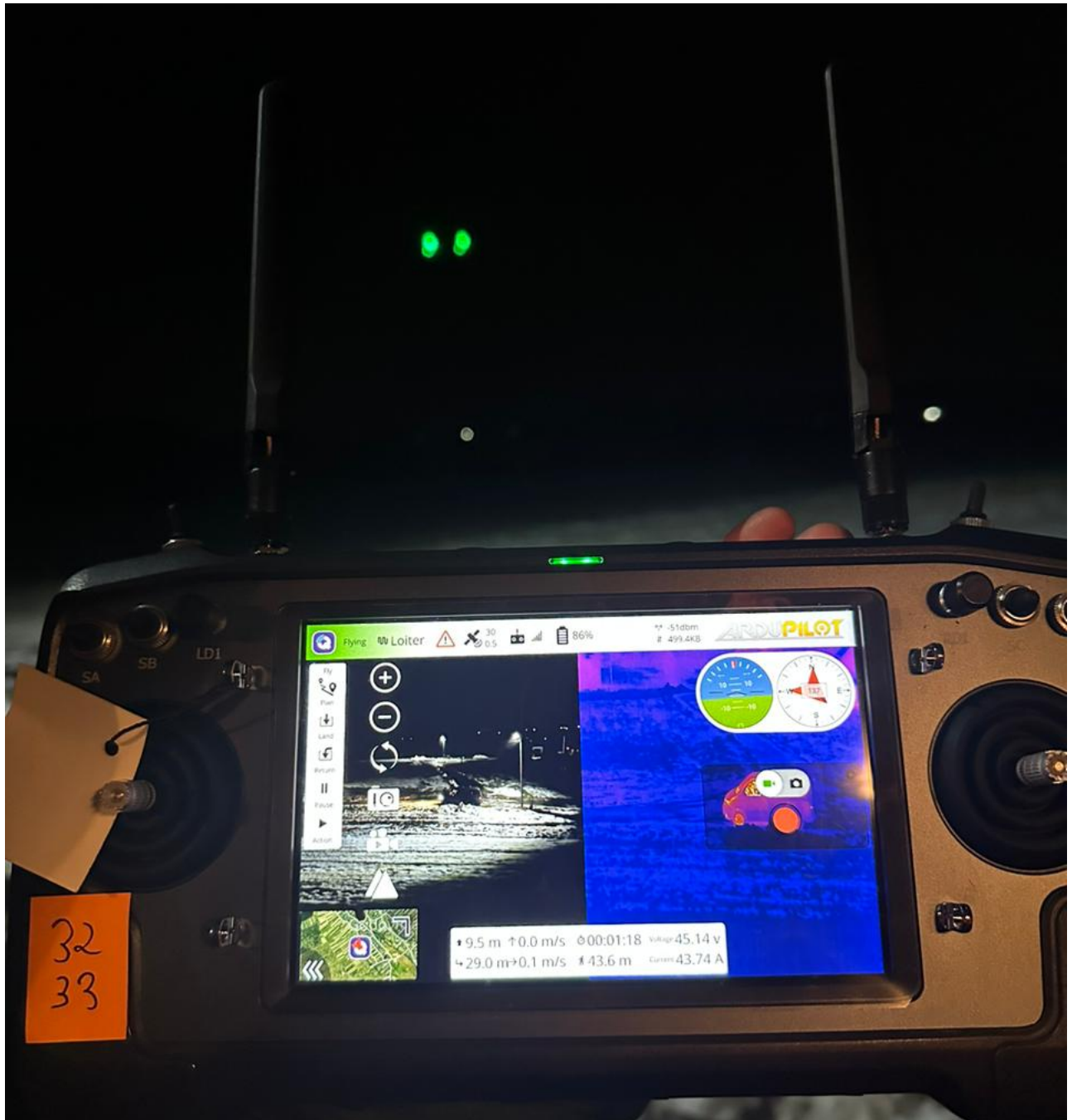


Рис. 4.3.3 Дані з екрану пульта керування

Бачимо, що в такому стані БПЛА споживає 43.74 А/год

### 2) аналіз отриманих результатів

Тепер проаналізуємо отримані дані та порівняємо їх із таблицею ефективності від виробника. Так як в таблиці вказані дані для одного двигуна, а в нас квадрокоптер (4 двигуни), відповідно, множимо ці дані на 4.

Шукаємо в таблиці дані по тязі наближені до 20кг. Найбільш наближений перший рядок (рис. 4.3.4)

X9-3411 Technical Parameters:

Voltage(V)	Propeller	Throttle (%)	Thrust(g)	Current(A)	Power(W)	Speed(RPM)	Efficiency(g/W)
		40%	5,005	9.6	444.2	1763	11.27

Рис. 4.3.4 Перший рядок з таблиці технічних параметрів від виробника

Множимо споживання (А) на 4 – 38,4 А. Отримані дані при порівнянні з фактичними мають розбіжність у 5,34 А. Так як виробник проводить тестування в ідеальних умовах, то таке відхилення допустиме. Також виходячи з даних, по таблиці бачимо, що БПЛА Surpiser працює в найефективнішому діапазоні – 11.27g/W

Із такими показниками він зможе провисіти в реальних умовах близько 60 хвилин.

Якщо збільшити акумулятор вдвічі – отримаємо загальну масу БПЛА 28кг, при такому навантаженні розрахункове споживання буде 68А/год, а враховуючи похибку неідеальних умов (13%), то споживання буде 76,84А. Ємність АКБ збільшилась також вдвічі (88 А), звідси впливає, що наш БПЛА зможе провисіти близько 68 хвилин. Це всього лиш більше на 8 хвилин від попереднього результату. При такій конфігурації БПЛА буде менш маневреним та з фінансового боку – вдвічі більші витрати на електроенергію при прирості всього 11,7% до часу польоту не є виправданими. Якщо захочемо зберегти параметри ефективності та збільшити час польоту, потрібно рухатись в бік збільшення розмірів гвинта та зменшення кількості обертів двигуна.

#### **Висновок до розділу 4**

Цей розділ показав, які практичні висновки можна зробити на основі отриманих даних, і визначає, які кроки можуть бути вжиті для поліпшення енергоефективності коптерних схем БпЛА.

У ході експериментів були виміряні параметри коптерної схеми, враховуючи характеристики гвинтомоторної групи, режими роботи моторів та системи живлення. Отримані дані були оброблені та проаналізовані згідно з розробленою методикою.

Аналіз результатів показав, що розроблена методика має потенціал для точної оцінки енергоефективності коптерних схем БпЛА та вибору оптимальної гвинтомоторної групи. Дані підтвердили важливість правильного підбору гвинтомоторної групи для досягнення максимальної продуктивності та тривалості польоту.

Завершуючи розділ, важливо відзначити, що експерименти є важливим кроком у впровадженні теоретичних досліджень у практику. Отримані результати можуть бути корисними для подальшого розвитку безпілотних літальних апаратів та покращення їх енергоефективності.

Детальний аналіз та використання отриманих даних в подальших дослідженнях можуть сприяти розробці більш ефективних та продуктивних систем БпЛА.



## ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

### Резюме проведених досліджень

У цьому дослідженні була розроблена методика оцінки енергоефективності коптерних схем безпілотних літальних апаратів (БПЛА) та проведено аналіз впливу різних конфігурацій гвинтомоторних систем на їх продуктивність. Важливість підвищення енергоефективності БПЛА полягає в збільшенні тривалості їх польоту та зниженні залежності від джерел енергії.

У розділі огляду літератури були розглянуті попередні дослідження щодо енергоефективності БПЛА та підбору гвинтомоторних систем. Це надало базовий контекст для подальшого дослідження.

Методика оцінки енергоефективності БПЛА була розроблена, включаючи визначення параметрів та критеріїв оцінки. Ця методика дозволяє систематично оцінювати різні конфігурації гвинтомоторних систем та вибрати найефективніші.

У розділі аналізу конфігурацій гвинтомоторів були розглянуті різні типи гвинтомоторних систем та їх вплив на продуктивність та споживану енергію БПЛА. Це дозволило визначити оптимальні конфігурації для різних завдань.

Експериментальні дослідження були проведені для перевірки ефективності розробленої методики та підбору оптимальних гвинтомоторних систем. Отримані дані підтвердили валідність розробленої методики та допомогли вибрати найкращі рішення для конкретних умов.

Загальний висновок полягає в тому, що підвищення енергоефективності гвинтомоторних систем може значно покращити продуктивність та тривалість польоту безпілотних літальних апаратів. Розроблена методика дозволяє систематично оцінювати та вибрати оптимальні конфігурації гвинтомоторних систем для різних завдань, що має важливе практичне значення в розвитку безпілотної авіації.

## **Висновки щодо досягнених результатів**

1. Розробка методики оцінки енергоефективності: в рамках дослідження була успішно розроблена методика оцінки енергоефективності коптерних схем безпілотних літальних апаратів (БпЛА). Ця методика включає визначення параметрів та критеріїв оцінки, що дозволяє систематично та об'єктивно оцінювати різні конфігурації гвинтомоторних систем.

2. Аналіз впливу конфігурацій гвинтомоторів: досліджено вплив різних конфігурацій гвинтомоторних систем на продуктивність та споживану енергію БпЛА. Цей аналіз допоміг визначити оптимальні конфігурації для різних завдань та умов.

3. Експериментальні дослідження: проведено експериментальні дослідження, що підтвердили валідність розробленої методики та допомогли вибрати оптимальні гвинтомоторні системи для конкретних умов. Отримані дані є підставою для практичного застосування результатів дослідження.

4. Практичне значення: результати цього дослідження мають важливе практичне значення для розвитку безпілотної авіації. Підвищення енергоефективності гвинтомоторних систем дозволить покращити тривалість польоту та продуктивність БпЛА, що важливо для багатьох галузей, включаючи моніторинг, дослідження, пошук та рятування, агрокультуру та інші сфери.

Отже, отримані результати підтверджують важливість і актуальність дослідження енергоефективності БпЛА та надають підставу для подальших досліджень та розробок у цій галузі.

## **Рекомендації для подальших досліджень**

1. Дослідження впливу матеріалів та конструкційних особливостей гвинтомоторних систем: подальші дослідження можуть включати аналіз впливу використовуваних матеріалів та конструкційних рішень на енергоефективність гвинтомоторних систем. Дослідження нових матеріалів та технологій може призвести до подальших покращень.

2. Врахування різноманітних умов експлуатації: дослідження можна розширити на вивчення енергоефективності БпЛА при різних погодних умовах, включаючи вітер, дощ та інші фактори. Це дозволить розробити більш універсальні рекомендації для практичного використання.

3. Розробка автоматизованих систем оптимізації: використання методів штучного інтелекту та оптимізації може допомогти розробити автоматизовані системи вибору оптимальних гвинтомоторних систем для конкретних завдань. Це полегшить процес підбору і покращить точність результатів.

4. Дослідження альтернативних джерел енергії: розгляд можливостей використання альтернативних джерел енергії, таких як сонячні батареї або паливні елементи, для живлення гвинтомоторних систем. Це може відкрити нові можливості для підвищення ефективності.

5. Дослідження впливу траєкторії польоту: врахування впливу конкретної траєкторії польоту на енергоефективність може бути корисним для визначення оптимальних шляхів руху та режимів роботи БпЛА.

6. Розробка стандартів та рекомендацій: важливим кроком може бути розробка стандартів та рекомендацій для оцінки та підбору гвинтомоторних систем у безпілотних літальних апаратах. Це допоможе спростити процес розробки та впровадження нових технологій.

Ці рекомендації можуть служити основою для подальших досліджень у галузі енергоефективності безпілотних літальних апаратів та сприяти подальшому розвитку цієї важливої сфери технологій.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Про затвердження Правил виконання польотів безпілотними авіаційними комплексами державної авіації України: Міністерство оборони України; Наказ, Правила від 08.12.2016 № 661. [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0031-17#n11>
2. Тимочко О. І. Класифікація безпілотних літальних апаратів / О. І. Тимочко, Д. Ю. Голубничий, В. Ф. Третяк, І. В. Рубан // Системи озброєння і військова техніка. 2007. Вип. 1. С. 61-67. Режим доступу: [http://nbuv.gov.ua/UJRN/soivt\\_2007\\_1\\_19](http://nbuv.gov.ua/UJRN/soivt_2007_1_19)
3. Матухно В. Ефективність використання безпілотних літальних апаратів для пошуку потерпілих / Матухно В. // Матеріали міжнародної науково-практичної конференції «Problems of emergency situations». 2022. Режим доступу: <http://repositsc.nuczu.edu.ua/handle/123456789/15603>
4. Мисливий В. Проблеми правового регулювання безпілотного транспорту / Мисливий В., Кліпановський А // Вісник НТУУ "КПІ" Політологія. Соціологія. Право № 2 (50) (2021). 2021. Режим доступу: [https://doi.org/10.20535/2308-5053.2021.%E2%84%962\(50\).242904](https://doi.org/10.20535/2308-5053.2021.%E2%84%962(50).242904)
5. Карабецький Д.П. Автоматизоване проектування гібридних сонячних енергетичних систем. - Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.13.12 «Системи автоматизації проектувальних робіт». – Національний авіаційний університет. – Київ, 2021. - 118 с. Режим доступу: <https://er.nau.edu.ua/handle/NAU/48977>
6. Розбицький В. А. Експериментальне дослідження профілю з щитком Крюгера в аеродинамічній трубці УТАД-2 НАУ / Розбицький В. А., Бондар О. В.
7. Kovačević, A., Svorcan, J., Hasan, M.S., Ivanov, T. and Jovanović, M. (2021), "Optimal propeller blade design, computation, manufacturing and experimental testing",

Aircraft Engineering and Aerospace Technology, Vol. 93 No. 8, pp. 1323-1332. Режим доступу: <https://doi.org/10.1108/AEAT-03-2021-0091>

8. Hang Zhu. Aerodynamic Performance of Propellers for Multirotor Unmanned Aerial Vehicles: Measurement, Analysis, and Experiment / Hang Zhu // Shock and Vibration. 2021. Режим доступу: <https://doi.org/10.1155/2021/9538647>

9. Аеродинаміка / Ю. О. Сметанін // Енциклопедія Сучасної України [Електронний ресурс] / Редкол. : І. М. Дзюба, А. І. Жуковський, М. Г. Железняк [та ін.] ; НАН України, НТШ. К. : Інститут енциклопедичних досліджень НАН України 2001. Режим доступу : <https://esu.com.ua/article-42702>

10. Теорія і практика засосування безпілотних літальних апаратів (дронів): Посібник / К: КНТ 2023. с. 69-70. Режим доступу: [https://drive.google.com/file/d/1Rj4E57mhf62LwAFaNwYtT5zpGxSP\\_RJ6/view](https://drive.google.com/file/d/1Rj4E57mhf62LwAFaNwYtT5zpGxSP_RJ6/view)

11. Перспективи розвитку технологій та підвищення рівня автономності БПЛА / Муравйов О.В., Довбиш І.О., Галаган Р.М., Богдан Г.А., Момот А.С. // Вчені записки ТНУ імені В.І. Вернадського. Серія: Технічні науки Том 34 (73) № 2 2023. Режим доступу: <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2023.2.1/32>

12. Романюк А. В. Задачі управління збором даних моніторингу БпЛА в безпроводових сенсорних мережах / Романюк А. В. // Збірник наукових праць ВІТІ № 2 2018. Режим доступу: [https://www.viti.edu.ua/files/zbk/2018/13\\_2\\_2018.pdf](https://www.viti.edu.ua/files/zbk/2018/13_2_2018.pdf)

13. Оптимізація енергодинамічних процесів у системі керування приводом стабілізації польоту безпілотного літального апарата / Ю. Денисов, О. Шаповалов, О. Серета, Є. Куц // Технічні науки та технології. 2018. № 3. С. 187-195. Режим доступу: [http://nbuv.gov.ua/UJRN/tnt\\_2018\\_3\\_25](http://nbuv.gov.ua/UJRN/tnt_2018_3_25)

14. Методологія ситуаційного колективного управління пілотованими і безпілотними літальними апаратами в єдиному повітряному просторі: наукові матеріали. В 3-х томах. Том 2. Інтегровані корпоративні моделі для колективного управління пілотованими і БПЛА в єдиному повітряному просторі в умовах ризику і невизначеності / Харченко В.П., Шмельова Т.Ф., Знаковська Є.А., Бугайко Д.О., Луппо О.Є., Лазоренко В.А., Аргунов Г.Ф. Мухіна М.П., Малютенко Т.Л., Кузьменко Н.С., Бондарєв Д.І., Петрушевський А.О., Шостак О.В., Благая Л.В. / За

ред. Харченко В.П.: К. : НАУ, 2017. 120 с. Режим доступу: <http://er.nau.edu.ua/handle/NAU/32014>

15. Якименко А.В. Тягові характеристики гвинтомоторної групи на основі безколекторного двигуна МТ 2213-935 KV та пропелера 10x4.5 / Якименко А.В., Ковбаса С.М. // Міжнародний науково-технічний журнал "Сучасні проблеми електроенерготехніки та автоматики". 2015. Режим доступу: <http://jour.fea.kpi.ua/article/view/68733/63820>

16. Про затвердження Авіаційних правил України «Правила використання повітряного простору України»: Державна авіаційна служба України, Міністерство оборони України; Наказ, Правила від 11.05.2018 № 430/210. [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z1056-18#Text>

17. Specifications. XRotor X9. Hobbywing. Режим доступу: <https://www.hobbywing.com/en/index.php/products/xrotor-x9109.html> (дата звернення: 19.12.2023)

18. Бойченко С В., Іванченко О.В. Положення про дипломні роботи (проекти) випускників Національного авіаційного університету. Київ: НАУ, 2017. - 63 с.

19. ДСТУ 3008-95 Документація. Звіти у сфері науки і техніки. Структура і правила оформлення. — Чинний від 01.01.1996. — Київ: Держстандарт України, 1996. — 20 с. Режим доступу: <https://zakon.rada.gov.ua/rada/show/n0001217-96#Text>