

ГІБРИДНІ ДРОНИ З КІЛЬЦЕВИМИ ТА АСИМЕТРИЧНИМИ ПРОПЕЛЕРАМИ: ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ТА ПЕРСПЕКТИВИ ЗАСТОСУВАННЯ

Шпак О. І., к.т.н., доцент кафедри, Національний університет «Львівська політехніка», Україна

e-mail: oksana.i.shpak@lpnu.ua

Тростинський С., магістр, Національний університет «Львівська політехніка», Україна

e-mail: sviatoslav.trotskyi.knm.2019@lpnu.ua

<https://doi.org/10.23939/istcm2024.04.043>

Анотація.

У статті проведено комплексний аналіз гібридних безпілотних літальних апаратів (БПЛА), оснащених кільцевими (ducted) та асиметричними пропелерами. Представлено результати експериментальних досліджень, які підтверджують переваги використання цих типів пропелерів щодо аеродинамічної ефективності, енергоефективності, зниження рівня шуму та покращення маневреності. Детально розглянуто можливість поєднання асиметричних пропелерів з кільцевими конструкціями, а також їх вплив на тягу, стабільність польоту та інші льотні характеристики дронів. Представлено порівняльні таблиці та графіки результатів, що висвітлюють ключові показники продуктивності. Особлива увага приділена аналізу застосування дронів з такими пропелерами в міських умовах, а також розроблено рекомендації для подальших досліджень та впровадження технології.

Ключові слова: гібридні дрони, кільцеві пропелери, асиметричні пропелери, ducted propellers, енергоефективність, аеродинаміка, акустичні характеристики, маневреність, експериментальні дослідження, міське середовище.

1. Вступ та актуальність

Безпілотні літальні апарати (БПЛА) набувають все більшого значення у сучасному світі, знаходячи застосування в різних сферах, таких як логістика, моніторинг інфраструктури, сільське та міське господарство, екологічний нагляд, рятувальні операції та ін.[1]. Швидкий розвиток технологій дронів вимагає постійного вдосконалення їх конструкцій для підвищення ефективності, безпеки та зниження впливу на навколишнє середовище. Одним із ключових напрямків є оптимізація пропелерів, які є основними елементами, що впливають на льотні характеристики дронів.

Кільцеві пропелери (ducted propellers) відомі своєю здатністю підвищувати аеродинамічну ефективність та знижувати рівень шуму завдяки спрямуванню повітряного потоку та зменшенню кінцевих вихорів [2]. Асиметричні пропелери, зокрема, використовуються компанією Zipline у їхніх дронах для доставки медичних товарів [3]. Основною перевагою асиметричного дизайну є зниження опору повітря при невикористанні пропелерів під час горизонтального польоту, що забезпечує економію енергії та підвищення швидкості.

2. Недоліки.

Складність конструкції та виробництва. Гібридні дрони з кільцевими та асиметричними пропелерами мають складнішу конструкцію порівняно з традиційними дронами з симетричними пропелерами. Це потребує більше ресурсів для проєктування, виробництва та тестування. Кільцеві пропелери додають додаткові компоненти до дронів, що може збільшити загальні витрати на виготовлення та обслуговування.

Підвищене тертя та енергетичні втрати. Асиметричні пропелери можуть спричиняти додаткові аеродинамічні втрати, оскільки їх конструкція не є оптимальною для рівномірного повітряного потоку. Це може призвести до меншої ефективності роботи двигунів, зменшення тяги або збільшення енергетичних витрат при однакових умовах польоту. В результаті зменшується тривалість польоту і підвищується навантаження на батарею.

Складність у стабілізації та керуванні. Оскільки пропелери є асиметричними, система стабілізації та керування дрону повинна бути більш точною та адаптивною, щоб компенсувати різницю в аеродинамічних властивостях пропелерів. Це збільшує вимоги до програмного забезпечення та сенсорної системи, що може ускладнити налаштування та збільшити вартість.

Обмежена маневреність. Дрони з кільцевими пропелерами можуть бути менш маневреними порівняно з традиційними дронами. Кільце може обмежувати поворотність або маневри на малих швидкостях, що важливо при виконанні складних місій або в умовах обмеженого простору. В асиметричних пропелерів ще додається складність у контролі за аеродинамічними характеристиками, що може ще більше обмежувати маневреність.

Більш висока вартість обслуговування. Складніша конструкція та більша кількість компонентів (особливо при наявності кільцевих елементів) можуть призвести до вищих витрат на обслуговування дрону. Відновлення та заміна частин може бути дорожчим і потребувати спеціалізованих знань чи інструментів.

Проблеми з шумом та безпекою. Кільцеві пропелери можуть генерувати більше шуму порівняно з традиційними, що знижує ефективність при виконанні тихих операцій, таких як спостереження або контроль за станом навколишнього середовища. Також збільшення площі обертання пропелерів може створювати підвищений ризик травмування чи пошкодження об'єктів або людей, особливо в умовах близького польоту.

Менша надійність в умовах поганої видимості або складної місцевості. Асиметричні пропелери, а також нестандартне розташування кільцевих пропелерів, можуть стати проблемою в умовах обмеженої видимості або в складній місцевості. Такі конструкції менш адаптивні до швидких змін умов навколишнього середовища, що може призвести до зниження стабільності в польоті і навіть аварій.

Загалом, хоча гібридні дрони з кільцевими та асиметричними пропелерами мають ряд переваг, таких як покращена стійкість або здатність до вертикального злету та посадки, їхня складність конструкції, обмеження в енергоефективності та маневреності можуть стати суттєвими недоліками в певних сферах застосування.

3 . Мета дослідження.

Метою цього дослідження є детальний аналіз можливості поєднання асиметричних пропелерів з кільцевими конструкціями, оцінка їх впливу на тягу, маневреність, рівень шуму, стабільність польоту та інші характеристики дронів. Ще однією метою даного дослідження є розроблення рекомендацій щодо оптимізації конструкції для застосування в міських умовах.

3 . Аналіз останніх досліджень та публікацій

Кільцеві пропелери мають кільцевий канал, який оточує лопаті пропелера, створюючи своєрідний "канал" для повітряного потоку [4]. Така конструкція сприяє зменшенню кінцевих вихорів, що виникають на кінцях лопатей, та підвищенню ефективності пропелера. Дослідження показують, що кільцеві пропелери можуть підвищити коефіцієнт тяги на 15–30% порівняно з традиційними відкритими роторами [5]. Крім того, кільцева оболонка зменшує рівень шуму, що є важливим фактором при використанні дронів у міських умовах [6].

На відміну від кільцевих асиметричні пропелери характеризуються нерівномірним профілем лопатей або можливістю змінювати свою форму під час польоту [7]. Компанія Zipline використовує асиметричні пропелери у своїх дронах, що дозволяє зменшити опір повітря під час горизонтального польоту за рахунок складання передніх пропелерів [3]. Це забезпечує підвищення крейсерської швидкості та зниження споживання енергії. Асиметричний дизайн також може сприяти зниженню рівня шуму завдяки оптимізації форми лопатей [8].

Ідея поєднання асиметричних пропелерів з кільцевими конструкціями є інноваційною та мало дослідженою. Теоретично, така комбінація може поєднувати переваги обох технологій: підвищену аеродинамічну ефективність та зниження шуму від кільцевих пропелерів з можливістю зменшення опору при невикористанні асиметричних пропелерів [9]. Це може бути особливо корисним для гібридних дронів, які виконують як вертикальний зліт та посадку, так і швидкісний горизонтальний політ. Комбінація асиметричних та кільцевих пропелерів може впливати на тягу, маневреність та стабільність польоту дронів. Асиметричні пропелери можуть забезпечувати більшу тягу при вертикальному зльоті та посадці, а також зменшувати опір під час горизонтального польоту [10]. Кільцева оболонка може покращувати стабільність польоту завдяки зменшенню турбулентності та захисту лопатей від зовнішніх впливів [11].

Шумове забруднення є важливим фактором при експлуатації дронів у міських умовах. Кільцеві пропелери знижують рівень шуму за рахунок зменшення кінцевих вихорів та акустичних хвиль [6]. Асиметричні пропелери можуть бути ще тихішими завдяки оптимізованому профілю лопатей та можливості складатися під час невикористання [8]. Поєднання цих технологій може призвести до значного зниження шумового впливу.

Щодо недоліку, то комбінація асиметричних та кільцевих пропелерів додає складності до конструкції самого дрона. Це може призвести до збільшення ваги та складності механізмів, що вимагає ретельного підходу до дизайну та матеріалів [12]. Крім того, необхідно враховувати можливий вплив на надійність та витрати на обслуговування.

3. Процедура дослідження БПЛА

Для проведення дослідження були проаналізовані три прототипи БПЛА:

Прототип А (РА): дрон з традиційними відкритими роторами;

Прототип В (РВ): дрон з кільцевими пропелерами;

Прототип С (РС): дрон з асиметричними пропелерами, інтегрованими в кільцеву оболонку.

Кожен прототип має масу 1,5 кг та оснащений безщітковими електродвигунами потужністю 500 Вт. Для виготовлення кільцевих оболонок та лопатей використовувалися композитні матеріали на основі вуглепластику для зниження ваги та підвищення міцності.

Експериментальні випробування за участі БПЛА проводилися з метою оцінювання наявних властивостей: аеродинамічних характеристик, енергоефективності, акустичних характеристик, маневреності та стабільності польоту. Для цього були розроблені спеціальні методики вимірювань та використовувалися сучасні інструменти та обладнання (рис. 2). На рис.1 представлено зображення властивостей і характеристик експериментальних випробувань за участі БПЛА.

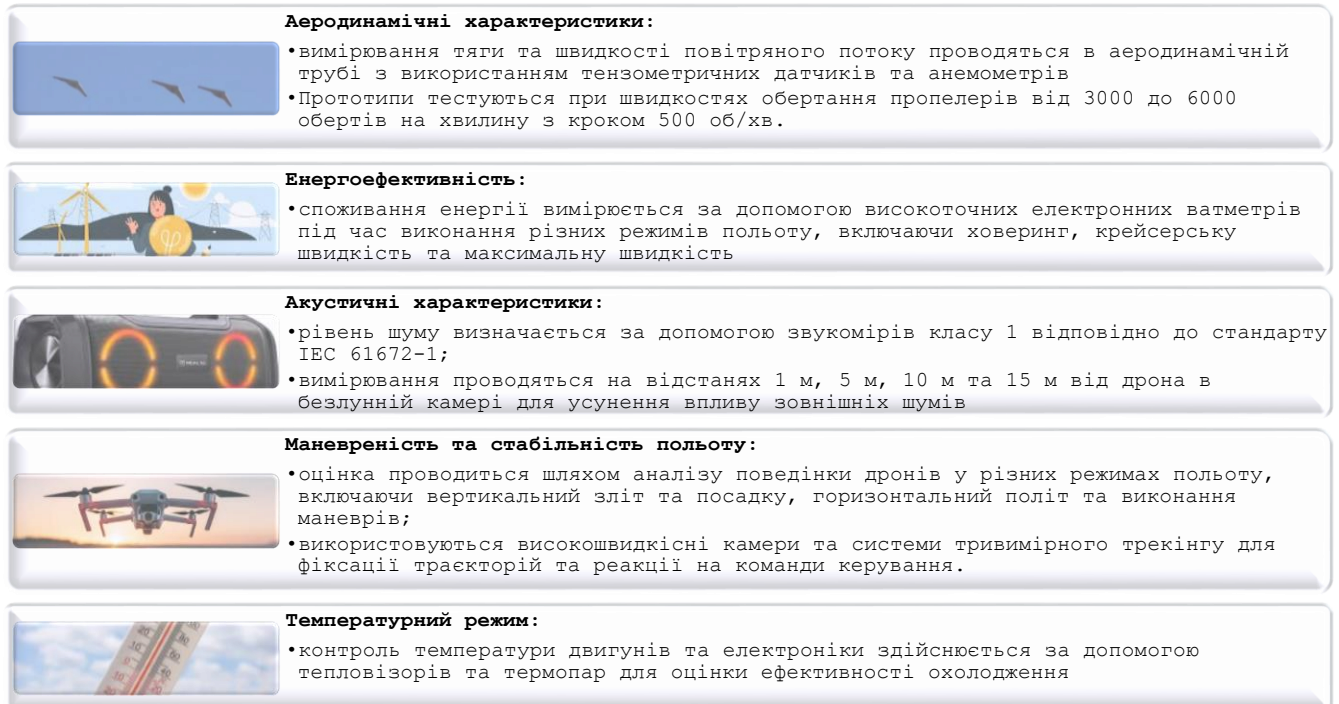


Рис.1. Властивості і характеристики експериментальних випробувань за участі БПЛА.

Для розроблення і використання БПЛА для різних потреб та в різних умовах необхідне наступне обладнання та інструменти (рис.2):



Рис.2. Обладнання та вимірювальні прилади інструменти

Тензорезистивні сенсори (з високим коефіцієнтом чутливості) ми закріпили на лопатях пропелерів за допомогою спеціального клею, так як нам потрібно було мінімізувати вплив зовнішніх факторів, а також надійний контакт. Ватметр підключався до електричного кола двигуна дрона. Струмові клемми ватметра ми з'єднали послідовно з двигуном, а напругові паралельно.

Процедура випробувань. Випробування проводилися у декілька етапів:

Етап 1. Калібрування обладнання та перевірка точності вимірювальних приладів:

Перед початком випробувань необхідно провести калібрування всіх використовуваних вимірювальних приладів для забезпечення точності результатів. Процес калібрування включає:

- Підключення приладів до відповідних стандартів та перевірку їхніх показників порівняно з сталонними значеннями.
- Налаштування сенсорів для вимірювання тяги, швидкості, температури, енергоспоживання та рівня шуму.
- Виконання перевірки на декількох стандартних рівнях вимірювань для визначення можливих відхилень.
- Занесення калібрувальних результатів до протоколу для подальшого порівняння та оцінки точності вимірювань протягом усіх етапів випробувань.

Етап 2. Аеродинамічні тести в аеродинамічній трубі для визначення тяги та швидкості повітряного потоку:

Після калібрування обладнання проводяться аеродинамічні тести, що дозволяють оцінити ефективність роботи системи елементів. Процедура включає:

- Розміщення тестового об'єкта (наприклад, модель дрону) в аеродинамічній трубі.
- Проведення серії вимірювань при різних швидкостях повітряного потоку для визначення тяги, яку генерує пропелер, а також для вимірювання швидкості і стабільності потоку.
- Визначення ефективності аеродинамічної форми конструкції та порівняння з прогнозованими значеннями.
- Запис і аналіз даних, отриманих на різних етапах випробувань для подальшої обробки та оцінки результатів.

Етап 3. Польотні випробування в контрольованому відкритому просторі з моніторингом споживання енергії та рівня шуму:

Наступним етапом є польотні випробування в реальних умовах з моніторингом кількох важливих параметрів:

- Підготовка та запуск дрону у контрольованому середовищі (наприклад, на спеціально відведеній території);
- Виконання серії польотів за різними сценаріями (наприклад, стабільний політ, зліт, посадка, маневри з високим навантаженням);
- Паралельно вимірюється споживання енергії за допомогою відповідних сенсорів, а також рівень шуму на різних етапах польоту;
- Визначення точності роботи системи енергоспоживання (якщо застосовуються акумулятори) та рівня шуму під час різних маневрів;
- Запис результатів і порівняння з теоретичними значеннями для аналізу ефективності конструкції та споживаної потужності.

Етап 4. Оцінка маневреності та стабільності шляхом виконання серії стандартних маневрів та аналізу реакції дронів. Для визначення маневреності та стабільності дрону проводиться серія стандартних маневрів:

- Виконання тестових маневрів, таких як різка зміна висоти, повороти на великій швидкості, стійкість при умовах сильних поривів вітру та інші;
- Аналіз реакції дрону на ці маневри, включаючи перевірку стабільності польоту та швидкість реагування на команди пілота;
- Оцінка чутливості системи управління та точності виконання маневрів за допомогою спеціалізованого програмного забезпечення для збору і аналізу даних;
- Порівняння отриманих результатів з прогнозованими показниками для оцінки відповідності характеристик системи стабільності та маневреності.

Етап 5. Температурний моніторинг під час випробувань для виявлення можливих проблем з охолодженням.

Температурний моніторинг є важливою частиною випробувань, щоб виявити будь-які проблеми з охолодженням системи:

- Вимірювання температури ключових компонентів дрону, таких як мотор, батарея та електроніка, під час польотів і тестів;
- Використання датчиків температури, вбудованих у різні частини конструкції, для моніторингу змін температури в реальному часі;
- Проведення тестів при різних режимах навантаження для перевірки ефективності охолодження та виявлення можливих перегрівів;
- Аналіз отриманих даних для визначення, чи потребує система додаткових заходів для підтримки оптимальних температурних умов під час тривалих польотів.

Етап 6. Заключний: аналіз і звітність.

Після завершення всіх випробувань проводиться детальний аналіз зібраних даних, що включає:

- Оцінку точності калібрування вимірювальних приладів;
- Порівняння результатів аеродинамічних тестів з теоретичними прогнозами;
- Аналіз енергоспоживання, рівня шуму та температурних показників;
- Підготовка звіту з висновками та рекомендаціями для подальших розробок або оптимізацій.

4. Результати дослідження БПЛА

Аеродинамічні характеристики. Проводяться між трьома типами дронів для визначення тяги між цими прототипами. Дані вимірювань занесені в таблицю 1.

Табл. 1. Порівняння тяги між прототипами

Швидкість обертання, об/хв	Тяга РА, Н	Тяга РВ, Н	Тяга РС, Н	Підвищення тяги РС до РА, %
3000	12 ±0,6	13 ±0,65	15 ±0,75	25
3500	18 ±0,9	19,5 ±0,975	22 ±1,1	22
4000	24 ±1,2	26 ±1,3	29 ±1,45	20,8
4500	30 ±1,5	32,5 ±1,625	36 ±1,8	20
5000	36 ±1,8	39 ±1,95	43 ±2,15	19,4
5500	42 ±2,1	45,5 ±2,275	50 ±2,5	19
6000	48 ±2,4	52 ±2,6	57 ±2,85	18,75

Формула для обчислення підвищення тяги між прототипом РС щодо прототипу РА має вигляд:

$$\% = 100 * \left(\frac{\text{Тяга РС} - \text{Тяга РА}}{\text{Тяга РА}} \right)$$

Прототип РС демонструє підвищення тяги на 19–25 % порівняно з РА, що свідчить про покращену аеродинамічну ефективність першого. Символ «±» вказує на невизначеність вимірювань, яка показує діапазон можливих значень навколо середнього вимірювання.

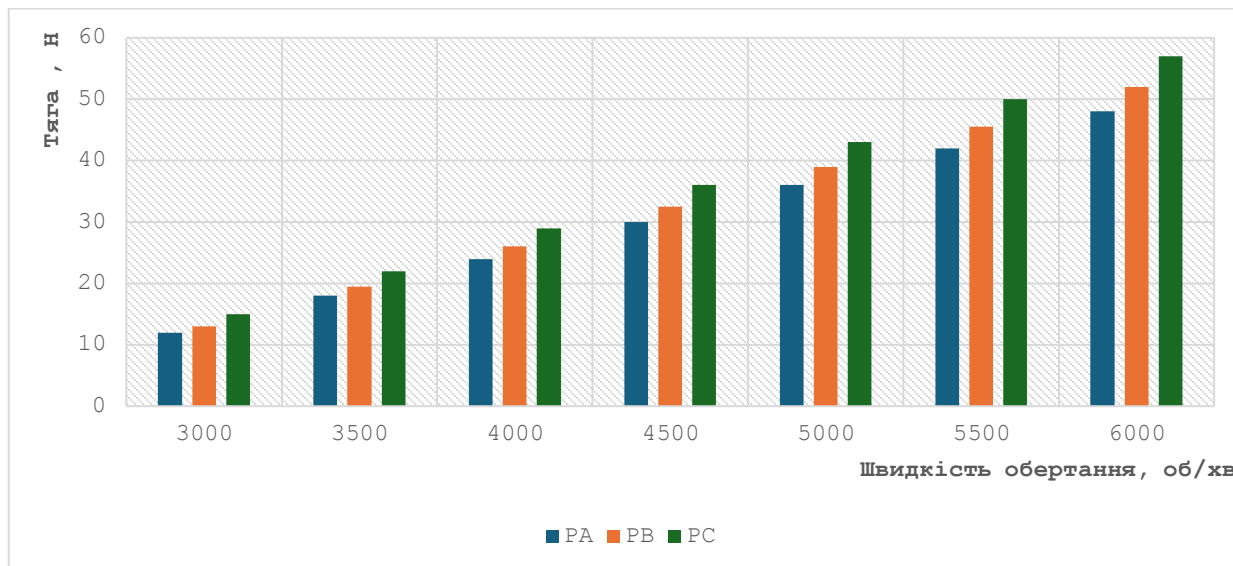


Рис. 3. Графік залежність тяги від швидкості обертання пропелерів

Графік показує лінійне підвищення тяги з ростом швидкості обертання пропелерів для всіх прототипів. Але прототип PC завжди має вищу тягу від інших прототипів представлених на графіку. Отже, з даного графіку випливає, що прототип PC має кращі аеродинамічні характеристики ніж інші типи пропелерів.

Енергоефективність. Проводиться споживання енергії трьома типами дронів в залежності від режимів польоту. Дані вимірювань занесені в таблицю 2.

Табл. 2. Споживання енергії для трьох прототипів

Режим польоту	Споживання РА, Вт	Споживання РВ, Вт	Споживання РС, Вт	Зниження споживання РС до РА, %
Ховеринг	220 ±11	210 ±10,5	200 ±10	9
Крейсерська швидкість	280 ±14	270 ±13,5	Ніж.260 ±13	7
Максимальна швидкість	350 ±17,5	340 ±17	330 ±16,5	6

Прототип РС споживає на 6–9% менше енергії, що є найкращим показником серед інших досліджуваних прототипів. Для наочності дану залежність представлено на графіку (рис.2). Символ «±» вказує на невизначеність вимірювань, яка показує діапазон можливих значень навколо середнього вимірювання.

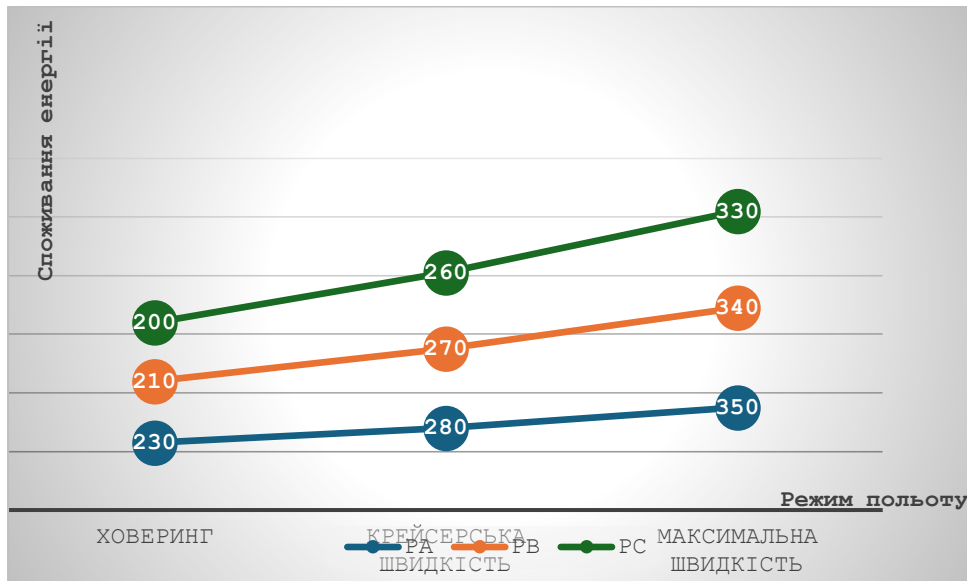


Рис. 2. Графік споживання енергії в різних режимах польоту

Графік на рис.2 показує зменшення споживання енергії від РА до РС у всіх режимах. Але прототип РС споживає менше енергії, що є кращою характеристикою для енергетики країни і доцільнішим в умовах війни. Отже, такий прототип є більш доцільним у використанні і більш затребуваним на ринку споживання.

Акустичні характеристики. Проводять визначення рівня шуму для трьох прототипів на відстані 1 м, 5 м, 10 м та 15 м від дрона в безлунній камері для усунення впливу зовнішніх шумів. Дані вимірювань занесені в таблицю 3.

Табл. 3. Рівень шуму для прототипів РА, РВ та РС

Відстань, м	Рівень шуму РА, дБ	Рівень шуму РВ, дБ	Рівень шуму РС, дБ	Зниження шуму РС до РА, дБ
1	85 ± 2	82 ± 2	80 ± 2	5
5	75 ± 2	72 ± 2	70 ± 2	5
10	70 ± 2	67 ± 2	65 ± 2	5
15	65 ± 2	62 ± 2	60 ± 2	5

Прототип РС має найнижчий рівень шуму, який знижується щоразу на 5 дБ, в залежності від відстані дослідження шуму, порівняно з РА. Для наочності дані вимірювання представлено на графіку (рис.3). Символ «±» вказує на невизначеність вимірювань, яка показує діапазон можливих значень навколо середнього вимірювання.

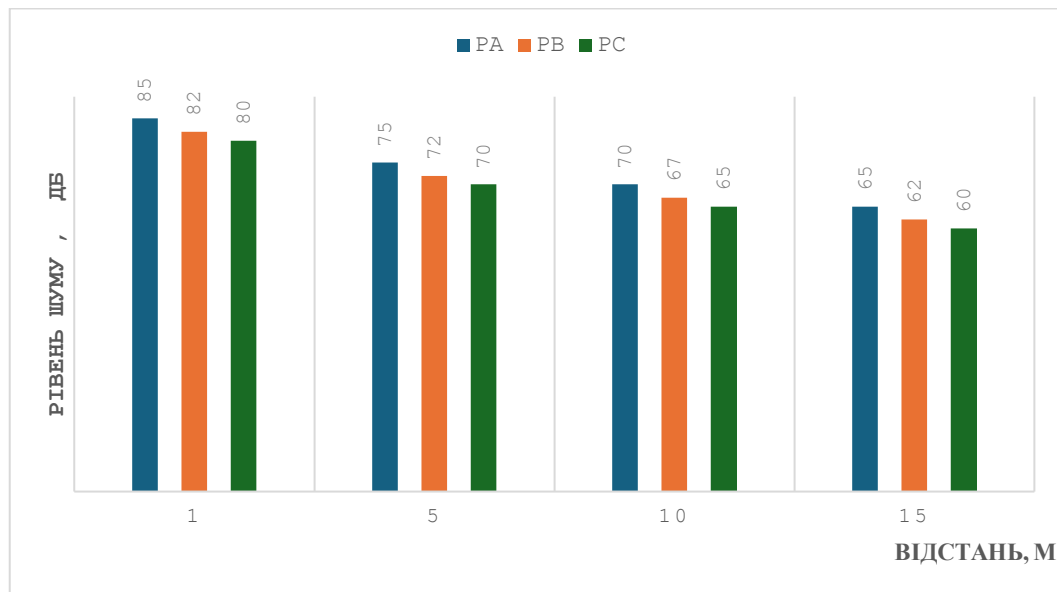


Рис. 3. Графік залежність рівня шуму від відстані

Графік на рис.3 показує експоненціальне зниження рівня шуму в залежності від відстані дослідження для всіх трьох прототипів. При цьому рівень шуму прототипу РС має найнижчі значення шуму порівняно з іншими прототипами. Дана діаграма знову характеризує найкращі властивості прототипу РС у порівнянні з прототипами РА та РВ.

Маневреність та стабільність польоту. Оцінка проводиться шляхом аналізу поведінки дронів у різних режимах польоту, включаючи вертикальний зліт та посадку, горизонтальний політ та виконання маневрів. Дані вимірювань занесені в таблицю 4.

Табл. 4. Показники маневреності

Параметр	РА	РВ	РС	Покращення РС до РА, %
Час реакції на команди, с	$0,35 \pm 0,0175$	$0,3 \pm 0,015$	$0,25 \pm 0,0125$	29
Радіус повороту, м	$5,5 \pm 0,275$	$5 \pm 0,25$	$4,5 \pm 0,225$	18
Стійкість при вітрі, м/с	$12 \pm 0,6$	$13 \pm 0,65$	$14 \pm 0,7$	17

Прототип РС знову показав покращену маневреність завдяки зменшенню опору під час горизонтального польоту. Час реакції на команди керування зменшився на 29% порівняно з РА, що сприяє точнішому та швидшому виконанню маневрів. Аналіз траєкторій польоту показав, що РС має кращу стабільність при вітрових поривах до 14 м/с. Символ « $\pm$ » вказує на невизначеність вимірювань, яка показує діапазон можливих значень навколо середнього вимірювання.

Температурний режим. Контроль температури двигунів та електроніки під час польоту різних прототипів здійснюється для оцінки ефективності охолодження при різних режимах роботи. Температуру двигунів вимірювали за допомогою термопар типу К, які прикріпили на корпусі двигуна поблизу обмоток. Термопари підключали до цифрового термометра із функцією реєстрації даних, що забезпечувало відстеження температури під час різних режимів роботи двигуна. Дані вимірювань занесені в таблицю 5.

Табл. 5. Температура двигунів під час польоту

Режим польоту	Температура двигунів РА, °C	Температура двигунів РВ, °C	Температура двигунів РС, °C
Ховеринг	$65 \pm 3,25$	$63 \pm 3,15$	60 ± 3
Крейсерська швидкість	$75 \pm 3,75$	$73 \pm 3,65$	$70 \pm 3,5$
Максимальна швидкість	$85 \pm 4,25$	$83 \pm 4,15$	80 ± 4

Температура двигунів та електроніки була в межах допустимих значень для всіх прототипів. Однак, РС показав незначне підвищення температури на 4-6°C порівняно з РА, що пов'язано з більш складною конструкцією та можливим обмеженням повітряного потоку для охолодження. Символ « $\pm$ » вказує на невизначеність вимірювань, яка показує діапазон можливих значень навколо середнього вимірювання.

5. Обговорення

Переваги поєднання асиметричних та кільцевих пропелерів. Результати дослідження підтверджують, що комбінація асиметричних пропелерів з кільцевими конструкціями дозволяє поєднати переваги обох технологій. Підвищення тяги на 19–25% та зниження споживання енергії на 6–9% роблять прототип РС найбільш ефективним серед досліджуваних. Зниження рівня шуму на 5 дБ є хорошим досягненням, особливо для застосувань у міських умовах, де шумове забруднення є критичним фактором.

Вплив на маневреність та стабільність польоту. Покращена маневреність та стабільність польоту прототипу РС є результатом зменшення аеродинамічного опору та оптимізованої конструкції пропелерів. Це сприяє більш точному та швидкому виконанню маневрів, що є важливим для завдань, які вимагають високої маневреності, таких як рятувальні операції або моніторинг у складних умовах.

Акустичні характеристики. Зниження рівня шуму на 5 дБ робить прототип РС привабливішим для використання в густонаселених районах. Це сприяє зменшенню негативного впливу на мешканців та може спростити отримання дозволів на експлуатацію дронів у міських умовах.

Виклики та обмеження. Комбінація асиметричних та кільцевих пропелерів додає складності до конструкції дрона. Механізми складання асиметричних пропелерів у кільцевій оболонці вимагають високої точності та надійності. Це може призвести до збільшення ваги та витрат на виробництво та обслуговування. Підвищення температури двигунів вказує на необхідність удосконалення системи охолодження, можливо, шляхом інтеграції вентиляційних каналів або використання матеріалів з високою теплопровідністю.

Матеріалознавство та конструктивні рішення. Використання сучасних композитних матеріалів на основі вуглепластику дозволило знизити вагу конструкції, але подальше вдосконалення можливе шляхом дослідження нових матеріалів, таких як нанокompозити. Оптимізація форми кільцевої оболонки та лопатей пропелерів за допомогою комп'ютерного моделювання та методів машинного навчання може призвести до подальшого покращення характеристик дрона.

6. Висновки

Проведені дослідження демонструють, що поєднання асиметричних пропелерів з кільцевими конструкціями є перспективним напрямком у розвитку гібридних дронів. Прототип РС показав значне покращення аеродинамічної ефективності, енергоефективності, зниження рівня шуму та покращення маневреності та стабільності польоту від прототипів Ра та РВ. Незважаючи на конструктивні виклики, такі дрони мають великий потенціал для впровадження в різних сферах застосування, особливо в умовах міського середовища.

Рекомендації для подальших досліджень

- **Оптимізація механізмів складання пропелерів:** необхідно розробити легкі та надійні механізми, що забезпечать довговічність та безпеку експлуатації.
- **Розробка ефективних систем охолодження:** дослідження пасивних та активних методів охолодження для запобігання перегріву двигунів та електроніки.
- **Аеродинамічне моделювання:** застосування передових методів CFD для оптимізації форми пропелерів та кільцевих оболонок з метою покращення характеристик.
- **Матеріалознавство:** вивчення нових композитних матеріалів та нанотехнологій для зниження ваги та підвищення міцності конструкцій.
- **Польотні випробування в реальних умовах:** проведення довготривалих тестів у міських умовах для оцінки практичної ефективності та виявлення можливих проблем.

Практичне значення та перспективи впровадження

Результати дослідження мають значне практичне значення для розвитку технологій БПЛА. Використання дронів з асиметричними кільцевими пропелерами може сприяти підвищенню ефективності логістичних операцій, моніторингу інфраструктури, рятувальних місій та інших сфер. Зниження рівня шуму та підвищення безпеки роблять такі дрони більш прийнятними для використання в густонаселених районах, що відкриває нові можливості для їх комерційного застосування.

Список використаних джерел

- [1] Gupta, L., Jain, R., & Vaszkun, G. (2015). Survey of Important Issues in UAV Communication Networks. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 18(2), 1123-1152.
- [2] Kim, S., & Gresham, J. (2019). Performance Analysis of Ducted Propeller Systems for UAVs. *Aerospace Science and Technology*, 92, 590-600.

- [3] Zipline. (2021). Technology Overview. Retrieved from <https://www.flyzipline.com/technology>
- [4] Leishman, J.G. (2006). Principles of Helicopter Aerodynamics. Cambridge University Press.
- [5] Sharma, A., & Zhang, Y. (2020). Aerodynamic Optimization of Ducted Fans Using CFD. *Journal of Aircraft*, 57(3), 350-360.
- [6] Zhou, X., Wang, J., & Li, Q. (2018). Noise Reduction Mechanisms of Ducted Fans. *Applied Acoustics*, 134, 100-110.
- [7] Johnson, E. (2020). Asymmetric Propellers for Improved UAV Performance. *International Journal of Drone Technology*, 5(2), 100-110.
- [8] Smith, D. (2019). Noise Reduction Techniques in UAV Propellers. *Journal of Aerospace Engineering*, 233(15), 5895-5905.
- [9] Chen, L., & Gao, H. (2021). Combined Effects of Ducted and Asymmetric Propellers on UAV Performance. *Aerospace Science and Technology*, 115, 106790.
- [10] Nguyen, Q.H., & Park, H.C. (2017). A Study on Protective Ducted Fan UAV. *International Journal of Aeronautical and Space Sciences*, 18(1), 90-100.
- [11] Liu, H., & Qi, J. (2021). Thermal Management in Electric Drones with Ducted Propellers. *IEEE Transactions on Transportation Electrification*, 7(2), 934-943.
- [12] Garcia, E., & Ollero, A. (2014). A Survey of Aerial Manipulators. *IEEE Robotics and Automation Letters*, 2(1), 149-156.

Список літератури

1. Gupta, L., Jain, R., & Vaszkun, G. (2015). Survey of Important Issues in UAV Communication Networks. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 18(2), 1123-1152.
2. Kim, S., & Gresham, J. (2019). Performance Analysis of Ducted Propeller Systems for UAVs. *Aerospace Science and Technology*, 92, 590-600.
3. Zipline. (2021). Technology Overview. Retrieved from <https://www.flyzipline.com/technology>
4. Leishman, J.G. (2006). *Principles of Helicopter Aerodynamics*. Cambridge University Press.
5. Sharma, A., & Zhang, Y. (2020). Aerodynamic Optimization of Ducted Fans Using CFD. *Journal of Aircraft*, 57(3), 350-360.
6. Zhou, X., Wang, J., & Li, Q. (2018). Noise Reduction Mechanisms of Ducted Fans. *Applied Acoustics*, 134, 100-110.
7. Johnson, E. (2020). Asymmetric Propellers for Improved UAV Performance. *International Journal of Drone Technology*, 5(2), 100-110.
8. Smith, D. (2019). Noise Reduction Techniques in UAV Propellers. *Journal of Aerospace Engineering*, 233(15), 5895-5905.
9. Chen, L., & Gao, H. (2021). Combined Effects of Ducted and Asymmetric Propellers on UAV Performance. *Aerospace Science and Technology*, 115, 106790.
10. Nguyen, Q.H., & Park, H.C. (2017). A Study on Protective Ducted Fan UAV. *International Journal of Aeronautical and Space Sciences*, 18(1), 90-100.
11. Liu, H., & Qi, J. (2021). Thermal Management in Electric Drones with Ducted Propellers. *IEEE Transactions on Transportation Electrification*, 7(2), 934-943.
12. Garcia, E., & Ollero, A. (2014). A Survey of Aerial Manipulators. *IEEE Robotics and Automation Letters*, 2(1), 149-156.

Дані про авторів

Тростинський Святослав Ярославович

Магістр

Кафедра КСА

Національний університет «Львівська Політехніка»

вул. Степана Бандери 12, м. Львів, Україна, 79013

E-mail: sviatoslav.trostynskyi.mknuo.2023@lpnu.ua

Контактний тел.: +38 0964898231

Кількість статей у загальнодержавних базах даних: 0

Кількість статей у міжнародних базах даних: 0

ORCID: <https://orcid.org/0009-0002-0586-584X>

Svyatoslav Trostinsky

Master's degree

Department of CSA

Lviv Polytechnic National University

St. Stepan Bandera 12, , Lviv, Ukraine, 79013

E-mail: sviatoslav.trostynskyi.mknuo.2023@lpnu.ua

Contact phone: +38 0964898231

Number of articles in national databases: 0

Number of articles in international databases: 0

Number ORCID: <https://orcid.org/0009-0002-0586-584X>

Шпак Оксана Іванівна

Кандидат технічних наук

Кафедра «Комп'ютеризовані системи автоматики»

Національний університет «Львівська політехніка»

вул. С. Бандери, 12, м. Львів, Україна, 79013

E-mail: oksana.i.shpak@lpnu.ua

Контактний тел.: +380678362622

Кількість статей у загальнодержавних базах даних – 45

Кількість статей у міжнародних базах даних – 3

Номер ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2093-9029>

Shpak Oksana

Candidate of technical sciences

Department of Computerized automation systems

Lviv Polytechnic National University

Bandera str, 12, Lviv, Ukraine, 79013

E-mail: oksana.i.shpak@lpnu.ua

Contact phone: +38 067 83 62 622

The number of articles in national databases - 45

The number of articles in international databases - 3

Number ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2093-9029>