УДК 629.7.035.5:629.7.014-519 **doi: 10.32620/aktt.2025.4sup1.10**

М. В. БОРИСЮК, Я. О. РУДКІН

Державне некомерційне підприємство «Державний університет «Київський авіаційний інститут», Київ, Україна

КОМПАКТНИЙ СТЕНД ДЛЯ ТЕСТУВАННЯ ОДИНОЧНИХ ГВИНТІВ МІНІ- ТА МІКРО- БЕЗПІЛОТНИХ ЛІТАЛЬНИХ АПАРАТІВ

У зв'язку зі збільшенням використання малогабаритних безпілотних літальних апаратів (БПЛА) у цивільних, наукових та оборонних сферах існує необхідність точного визначення аеродинамічних та енергетичних характеристик повітряних гвинтів, оскільки саме характеристики повітряних гвинтів істотно впливають на ефективність польоту, стабільність керування та тривалість автономної роботи. Для визначання характеристик гвинтів БПЛА представлено розробку стенду для експериментального тестування одиночних повітряних гвинтів, призначених для міні- та мікробезпілотних літальних апаратів. Метою дослідження було створення компактного експериментального стенда, з доступними компонентами, з можливістю фіксувати основні параметри — тягу, струм, напругу, забезпечуючи достатню точність та відтворюваність результатів. Стенд створено з використанням полімерного каркасу на основі 3D-друкування, що забезпечує легкість і жорсткість конструкції. В якості двигуна використано безколекторний електромотор, а вимірювання параметрів реалізовано за допомогою тензодатчика, шунта струму, а також датчика напруги. Дані зчитуються мікроконтролером та відображаються в реальному часі, що дозволяє полегшити аналіз та калібрування. Проведено серію експериментів з повітряними гвинтами трьох діаметрів (7, 8 і 10 дюймів). Під час проведення експериментів було зафіксовано залежності тяги та струму від числа обертів. Встановлено, що 8-дюймовий гвинт демонструє оптимальне співвідношення тяги до енергоспоживання. Цей результат буде корисним для вибору повітряного гвинта в задачах проектування міні-БПЛА. Повторюваність результатів за основними параметрами становила не більше 5%, що свідчить про надійність вимірювальної системи. Можна зробити висновок порівнюючи з аналогічними розробками, що запропонована конструкція поєднує найбільш важливі риси: простоту, доступність, модульність та достатню точність. Таким чином, стенд може бути ефективно використаний у дослідницьких лабораторіях, в освітньому процесі, а також у процесі проектування та налагодження міні- та мікро- Б У подальшому створений стенд передбачає збільшення вимірюваних параметрів, а саме встановлення датчиків обертів, температури та вібрацій, а також створення системи з регульованим кутом атаки лопатей для дослідження гвинтів зі змінним кроком.

***Ключові слова**: безпілотний літальний апарат; стенд; тестування; тяга; напруга; повітряний гвинт; аеродинамічні характеристики; компактний.*

Вступ

В останні роки спостерігається стрімкий розвиток проектування та виробництва безпілотних літальних апаратів (БПЛА), особливо в сегменті міні- і мікро-платформ. Відомо, застосування компактних апаратів займає все більший простір в різних сферах, включаючи такі завдання, як дослідницькі, аерофотознімання, доставку вантажів, моніторинг навколишнього середовища, а також для виконання військових завдань [1, 2].

Одним з основних завдань при проектуванні таких платформ є забезпечення високої енергетичної ефективності та заданого режиму польоту. Це значною мірою залежить від аеродинамічних і механічних характеристик гвинтів, що застосовуються на зазначених літальних апаратах [1, 3].

Одним із важливих компонентів, що визначають ефективність роботи БПЛА, є повітряні гвинти. Такі критично важливі параметри, як максимальна вантажопідйомність, тривалість польоту, маневреність і енергоспоживання безпосередньо пов'язані з характеристиками повітряного гвинта [3, 4]. Такими характеристиками повітряного гвинта є тяга, частота обертання, споживання струму та напруги, оскільки вони суттєво впливають на забезпечення льотних якостей БПЛА, особливо в умовах обмеженої вантажопідйомності і ємності акумулятора. Найменші відхилення у виборі гвинта можуть привести до значного зменшення часу та погіршення стабільності польоту.

Однак процес випробування гвинтів для міні- і мікро- БПЛА пов'язаний з низкою специфічних проблем. Існуючі тестові стенди для повітряних

Creative Commons Attribution NonCommercial 4.0 International

ISSN 1814-4225 (print)
ISSN 2663-2012 (online)

гвинтів найчастіше громіздкі, складні в калібруванні, вимагають спеціалізованого устаткування й певних умов експлуатації, що ускладнює оперативне розгортання в польових умовах [4 - 6]. Це накладає суттєві обмеження на доступність випробувань гвинтів для невеликих дослідницьких груп, освітніх закладів і незалежних розробників. У результаті, дослідження міні-БПЛА найчастіше покладаються на теоретичні розрахунки або неповні експериментальні дані, що знижує точність проектування [7].

Також, як показано в дослідженні [8], необхідно зазначити що для малих гвинтів характерні особливі аеродинамічні ефекти, пов'язані з низькими числами Рейнольдса – тобто такими режимами обтікання, за яких в'язкі сили відіграють домінуючу роль над інерційними. Внаслідок цього потік повітря навколо лопатей стає переважно ламінарним, з ранніми відривами і нестабільним розподілом тиску, що істотно впливає на підйомну силу і опір. Тому, під час моделювання та тестування, важливо враховувати ці особливості, що вимагає спеціалізованих підходів. Це унеможливлює просту екстраполяцію даних, отриманих для гвинтів більших розмірів, та підкреслює необхідність у спеціалізованих випробувальних системах.

Метою даної роботи є розробка компактного, модульного й доступного стенда для тестування одиночних гвинтів міні- і мікро- БПЛА. Пристрій повинен дозволяти швидко проводити експерименти з різними типами гвинтів, фіксуючи основні параметри — тягу, напругу й споживаний струм — з високою точністю й стабільністю результатів. Спрощене монтування, мала маса та модульність конструкції також є важливими вимогами для використання в освітніх лабораторіях і інженерних проектах.

Основними завданнями даного дослідження є розробка тривимірної моделі корпусу, збірка стенду, а також, проведення експериментального тестування повітряних гвинтів 7, 8 і 10 дюймів.

Огляд існуючих досліджень

Як наведено вище, одним з основних завдань при розробці гвинтів для міні- і мікро- БПЛА є одержання достовірних експериментальних даних, які б дозволяли оцінювати тягові характеристики та ефективність гвинта в реальних умовах.

У статті [1] представлений стаціонарний стенд, розроблений для всебічного тестування силової установки БПЛА, який складається з акумулятора, електронного контролера швидкості (ESC), електродвигуна і повітряного гвинта. Стенд оснащений високоточним тензометричним датчиком для вимірювання тяги, а також вбудованими сенсорами напруги й струму, що дозволяють оцінювати потужність і ефективність. Однією з важливих особливостей підходу є забезпечення термодинамічних умов, близьких до реальних, що дозволяє аналізувати стійкість роботи всього ланцюжка компонентів при різних навантаженнях.

Стенд призначений для оцінки взаємодії всіх елементів силової установки й дозволяє проводити довготривалі випробування з контролем стабільності вихідних параметрів. Такий підхід особливо корисний при розробці нових конфігурацій силових установок для мультикоптерів, оскільки він виявляє слабкі місця в системі й дає можливість оптимізувати як окремі компоненти, так і їх спільну роботу. Однак, конструкція стенда громіздка й орієнтована в першу чергу на лабораторні умови, що обмежує її застосовність у польових випробуваннях або при обмеженому просторі.

Ще одне дослідження [9] орієнтоване на проектування стенда для тестування повітряних гвинтів зі змінним кроком. Автори розробили систему з PID-регулятором, яка дозволяє точно втримувати задані параметри тяги або числа обертів за допомогою динамічного керування кутом атаки лопатей. Основним завданням тестового комплексу є дослідження аеродинамічної поведінки й ефективності гвинтів при різних режимах навантаження та конфігураціях кроку. Використовувані датчики фіксують тягу, оберти, а також кути повороту лопатей, що дозволяє будувати багатофакторні залежності.

Така система є більш складною в порівнянні з іншими, але забезпечує набагато більш широкий діапазон випробувань. Вона націлена в першу чергу на дослідження гвинтів для VTOL-дронів, вертольотів або систем з активним керуванням тягою. Проте, її застосування обмежується високими вимогами до точності складання та програмування PID-регулятора, а також наявності сервоприводів і складної системи керування, що значно підвищує вимоги виробництва й обслуговування.

Підхід, представлений у статті [5], являє собою дослідження характеристик підйомної сили та аеродинаміки для БПЛА з використанням ефекту Коанда. Хоча основна увага в роботі приділена новій конфігурації безпілотника, суттєвим елементом методології є експерименти по вимірюванню аеродинамічних характеристик повітряного потоку й підйомної сили, що виникають при роботі обертових систем. Авторами розроблено лабораторну установку, яка дозволяє як чисельно, так і експериментально досліджувати розподіл тиску й сили, що генерується проточною системою з віднесенням до реальних умов польоту. Експерименти проводилися в аеродинамічній трубі, при цьому застосовувалися методи PIV (Particle Image Velocimetry) для візуалі-

зації потоку й сенсори тиску для реєстрації параметрів потоку й створюваних сил.

Незважаючи на те, що в дослідженні не розглядалися окремі гвинти як самостійні об'єкти випробувань, дана методика демонструє сучасний науковий підхід до вимірювання аеродинамічних параметрів і сил, які можуть бути адаптовані для оцінки ефективності повітряних гвинтів. Особливо цінне використання PIV-систем і чисельного моделювання для калібрування й інтерпретації результатів. Робота підкреслює важливість точного експериментального стенда з контрольованими умовами, а також датчиками високої роздільної здатності при розробці нестандартних конфігурацій БПЛА, що може бути корисним орієнтиром при проектуванні стендів для оцінки тяги гвинтів і супутніх параметрів.

У роботі [10] представлений універсальний експериментальний стенд для точного вимірювання параметрів гвинтів безпілотних літальних апаратів, включаючи тягу, споживаний струм і максимальну частоту обертання. Конструкція стенда включає 3D-друкований корпус із високоударостійкого листового пластику на основі поліетилентерефталату зі співполімером гліколем (PETG), на якому закріплені датчики сили, оптичний датчик обертів і безколекторний двигун із гвинтом. Для мінімізації впливу ефекту землі повітряний гвинт встановлено догори ногами, а вимірювальна платформа піднята на 100 мм над напрямною пластиною, що знижує вплив відбитих потоків повітря. Система збору даних заснована на мікроконтролері Atmega2560, який зчитує дані з датчиків і зберігає їх на microSD-карту для наступного аналізу. Додатково виміряються напруга акумулятора, температура й вологість навколишнього середовища, що забезпечує більш точні та відтворені результати.

Проведені вимірювання дозволили встановити залежності між шириною керуючого імпульсу й обертами двигуна, струмом і обертами, а також тягою та обертами. Аналіз даних показав, що ці залежності можна апроксимувати кубічними функціями з коефіцієнтом детермінації R^2 від 0,998 до 0,999, що свідчить про високу точність моделі. Отримані рівняння дозволяють прогнозувати поведінку гвинта в умовах, що виходять за рамки проведених експериментів. Розроблений стенд відрізняється модульністю, точністю й можливістю автономної роботи, що робить його корисним інструментом для дослідників і розробників БПЛА.

Експериментальна установка

Експериментальна установка була спроектована з урахуванням вимог компактності, швидкого збирання та модульності. Основу конструкції становить твердий несучий каркас, виготовлений з полімерного матеріалу методом 3D-друку, що установлений на горизонтальній поверхні з антивібраційними демпферами. На каркасі розміщені основні вузли: кріплення двигуна й гвинта, вимірювальний модуль із тензодатчиком, струмовий шунт і вольтметр. Саме компонування дозволяє мінімізувати вплив паразитних вібрацій і спрощує заміну гвинта або двигуна без повного розбирання стенда (рис.1).

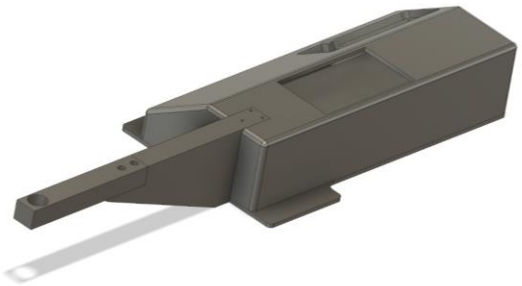

Рис. 1. 3-D модель стенда

Вузол кріплення гвинта – алюмінієвий тримач, який дозволяє встановлювати гвинти різних діаметрів. Гвинт приводиться в дію електромотором Emax ECO II, який є безколекторною моделлю з потужністю до 1,5 кВт і постійною напругою живлення 12 В. Це дозволяє забезпечити широкий діапазон робочих швидкостей і стабільну роботу в різних режимах.

Вимірювальна система змонтована в полімерному корпусі, у який інтегрований датчик тяги – тензорезистивний модуль із діапазоном до 7 кг, що забезпечує високу чутливість і стабільність сигналу. Також були встановлені датчик струму (до 10 А) і датчик напруги INA3221 (до 26 В). Для забезпечення точності вимірювань кожний з датчиків проходив попереднє калібрування. Тензодатчик калібрувався з використанням стандартних вантажів від 100 до 1000 г із кроком 100 г (рис. 2).

Рис. 2. Вимірювальний модуль

Похибка після калібрування не перевищувала ±2%. Вимірювання струму перевірялося за допомо-

ISSN 1814-4225 (print)
ISSN 2663-2012 (online)

гою еталонного шунта і мультиметра, а напруга — при підключенні лабораторного джерела з відомим навантаженням. Усі калібровані коефіцієнти були внесені в прошивку мікроконтролера Atmega328P, що забезпечує збір та первинну обробку даних, з яким з'єднані всі датчики. Відображення параметрів відбувається в реальному часі.

Розробка запропонованого стенда спиралася на підходи, викладені в низці наукових публікацій, де також піднімалися питання точності вимірювань, адаптивності конструкції та оптимізації монтажу. У роботі [1] описаний стенд, призначений для тестування всієї силової установки мультикоптера. Суттєвою перевагою запропонованого стенду при збереженні основних принципів, таких як вимірювання тяги, струму й напруги, є виконання у компактній і мобільній формі. Також, у статті [2] реалізована установка на базі Arduino і HX711, здатна реєструвати тягу гвинта. Ця робота підкреслила важливість механічної твердості й захисту від вібрацій, що було враховано при розробці даної конструкції, а також додані струмові та вольтметричні вимірювання, що дозволило оцінювати енергетичну ефективність і навантажувальні характеристики гвинтів. Також був доданий модуль візуалізації в реальному часі.

Методика та реалізація випробувань

Випробування гвинтів проводилися в певній послідовності, що була спрямована на забезпечення відтворюваності та достовірності вимірювань. Перед початком тестування кожний гвинт встановлювався на тримач, після чого виконувалося підключення всіх компонентів вимірювальної системи до джерела живлення. Потім проводилася попередня перевірка справності системи й калібрування вимірювальних каналів. Після підтвердження коректної роботи всіх датчиків здійснювався запуск електродвигуна, при цьому швидкість обертання збільшувалася плавно – від мінімального рівня до граничного значення.

Експериментальні випробування проводилися в діапазоні обертів від 500 об/хв до 20000 об/хв. На кожному етапі фіксувалися тяга, струм і напруга. Отримані дані використовувалися для побудови залежностей: «тяга – оберти», «тяга – потужність», «струм – навантаження». Кожний тест повторювався мінімум три рази для оцінки повторюваності результатів, аналогічно підходу, який наведений у роботі [11]. Температура й вологість навколишнього середовища реєструвалися, але не коректувалися в розрахунках, тому що проводилися в приміщенні при стабільних умовах (22–23 °C, вологість 40–50%).

Результати тестування показали високу повторюваність (до ±5%) і відповідність експериментальних даних теоретичним залежностям між тягою, обертами й споживаною потужністю. Графіки залежності тяги від числа обертів демонстрували характерну лінійну залежність із насиченням при високих обертах, у той час як залежність струму від навантаження відповідала моделям внутрішнього опору.

Виходячи з висновків у статті [12], для зниження перешкод від вібрацій і температури були використані демпфери й стабілізатори. А також, для збільшення кількості вимірюваних параметрів, передбачена можливість установки додаткових датчиків (наприклад, частоти обертання та температури).

Таким чином, запропонована конструкція поєднує ідеї існуючих рішень, таких як, модульність і легкість складання з новими елементами – компактністю та акцентом на енергоефективність, що робить її практичною в застосуванні як для дослідницьких, так і для навчальних завдань.

Результати та обговорення

Експериментальні дослідження проводилися з використанням трьох гвинтів різного діаметра — 7, 8 і 10 дюймів — при постійній напрузі живлення 12 В (рис. 3-5) . Для кожного гвинта реєструвалися значення тяги, споживаного струму й напруги на різних рівнях ширини керуючого сигналу ШІМ, відповідних до ступенів потужності двигуна. Отримані дані були використані для побудови залежностей і аналізу ефективності.

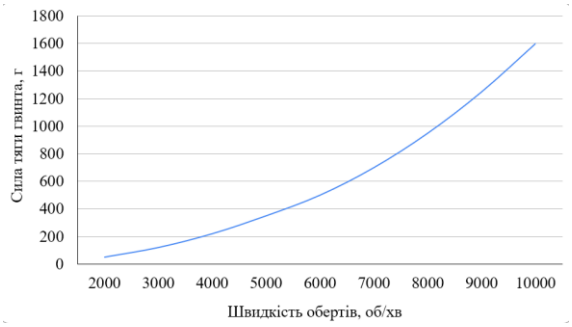

Рис. 3. Залежність тяги гвинта розміром 7 дюймів від обертів за хвилину

У всіх випадках спостерігалася стійка нелінійна залежність тяги від числа обертів. Гвинт діаметром 7 дюймів забезпечував максимальну тягу до 850 г, тоді як 8-дюймовий — близько 1000 г, а 10-дюймовий — більше ніж 1600 г. Аналіз споживаного струму показав, що для кожного гвинта спостерігається експонентне зростання енергоспоживання зі збільшенням обертів. Наприклад, гвинт 8 дюймів при максимальних обертах споживав на 90% більше

току ніж 7-дюймовий гвинт, тоді як 10-дюймовий споживав — на 70% більше току ніж гвинт на 8 дюймів.

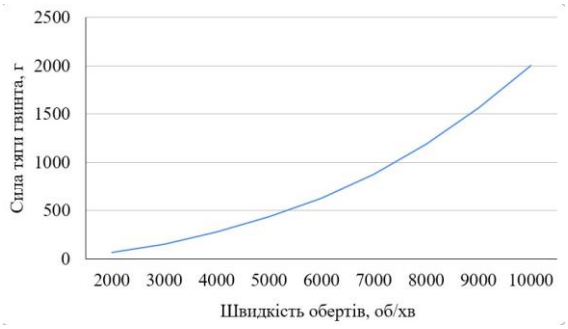

Рис. 4. Залежність тяги гвинта розміром 8 дюймів від обертів за хвилину

Це пов'язане з тим, що при збільшенні площі лопатей і швидкості обтікання зростає аеродинамічний опір, а отже, і навантаження на двигун. Виміряна напруга залишалася практично постійною на всьому діапазоні, що підтверджує коректну роботу джерела живлення.

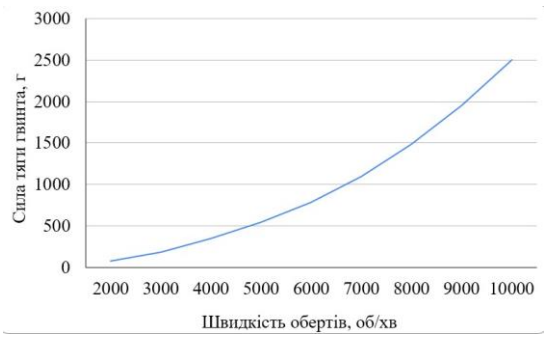

Рис. 5. Залежність тяги гвинта розміром 10 дюймів від обертів за хвилину

Повторне проведення кожного випробування з тими ж параметрами показало високу точність отриманих результатів: відхилення по тязі не перевищували 3-5% у межах одного гвинта. Похибка вимірювань струму й напруги не перевищувала 2%, що відповідає характеристикам застосовуваних датчиків. Це підтверджує придатність розробленого стенда для відтворених і надійних вимірювань у рамках заданих режимів роботи.

Одержані в процесі випробувань дані дозволяють провести комплексну оцінку аеродинамічної й енергетичної ефективності протестованих гвинтів, а також проаналізувати особливості поведінки різних типорозмірів у заданих режимах роботи. Результати підтверджують загальні теоретичні залежності й відповідають раніше опублікованим експериментальним даним.

При зіставленні характеристик протестованих гвинтів можна відзначити закономірності, відповідні до відомих моделей лопатевої аеродинаміки повітряних гвинтів. Зокрема, збільшення діаметра гвинта призводить до зростання створюваної тяги при тих же обертах, що пояснюється зростанням площі робочої поверхні гвинта. Однак разом із цим зростає й навантаження на двигун.

При цьому 8-дюймовий гвинт виявився оптимальним по співвідношенню тяги до споживаної потужності, особливо в діапазоні 60-80% від максимальних обертів. Це надає перевагу при обранні варіанту для легких міні-БПЛА, де особливо важлива енергетична ефективність. Аналогічні висновки були зроблені в роботі [1], де підкреслювалося значення балансу між тяговими характеристиками та енергоспоживанням при виборі гвинтів.

Як показали повторні тести, розкид вимірювань не перевищував 3-5% по тязі, а також 2% по електричних параметрах. Це говорить про достатню точність вимірювальної системи й придатності стенда для регулярних порівняльних випробувань [13]. Використання попереднього калібрування і виключення впливу зовнішніх факторів (таких як потік повітря від навколишніх об'єктів і нестабільне живлення) забезпечили необхідну точність. Такий рівень стабільності співставний з результатами, представленими в роботі [10], де відхилення вимірювань також укладалися в межі 5%.

Крім того, вибір піднятого розміщення гвинта над платформою, запозичений з методики [10], підтвердив свою ефективність – дані були стабільні, а ефект землі не спотворював криві залежності тяги від обертів. Це особливо важливо для малих гвинтів, чутливих до відбитих потоків, як вказується в роботі [2].

Таким чином, розроблений стенд підтвердив свою придатність для аналізу характеристик малих гвинтів, з високим ступенем точності й відтворюваності. Його можливості можуть бути розширені за рахунок установки додаткових датчиків, наприклад, частоти обертання й температури двигуна.

Переваги розробленого стенда

Результати дослідження та порівняльний аналіз існуючих рішень дозволяють виділити низку значимих переваг запропонованого стенда в порівнянні з аналогами, представленими в науковій літературі й інженерній практиці.

Однією з головних переваг конструкції можна назвати її компактність і портативність. Усі елементи стенда розміщені на невеликій підставці, а корпус виготовлено з легкого пластику. Це робить установку зручною для транспортування й швидкого мон-

ISSN 1814-4225 (print)
ISSN 2663-2012 (online)

тажу в різних умовах — від лабораторних до польових. На відміну від громіздких стаціонарних стендів, таких як у роботі [1], даний стенд не вимагає спеціалізованої інфраструктури й може використовуватися в невеликих навчальних класах, на виїзних випробуваннях та при виконанні військових завдань.

Стенд розрахований на швидке розгортання без застосування складних інструментів. Використовувані компоненти — електромотор Emax ECO II, датчики струму й напруги, мікроконтролер Atmega328P — доступні й легко налаштовуються за допомогою відкритого програмного забезпечення, а калібрування не вимагає професійного устаткування. Щодо цього стенд спирається на принципи, описані в [2] і [10], але робить їх значно доступнішими і завершеними в інженерній реалізації.

Незважаючи на простоту конструкції, установка забезпечує стабільні й точні вимірювання. Відхилення в межах 3-5% по тязі та менше 2% по струму і напрузі є прийнятними для експериментальних досліджень в області малих БПЛА [14]. Подібна точність порівняна з більш складними та дорогими системами. Можливість повторного проведення експериментів з високим ступенем відтворюваності робить стенд придатним як для наукових цілей, так і для інженерного проектування.

Використання доступних комплектуючих, можливості локального виробництва (наприклад, друк корпусу на 3D-принтері) і відмова від дорогих інтерфейсів та устаткування роблять запропонований стенд економічно вигідним рішенням. Його собівартість на порядок нижче професійних промислових аналогів. Це відкриває можливості для широкого впровадження в навчальних закладах, студентських проектах, малих інженерних стартапах і лабораторіях з обмеженим бюджетом.

Конструкція передбачає можливість подальшого розширення функціональності. Зокрема, легко реалізоване додавання:

- оптичного або магнітного датчика частоти обертання (RPM);
- термодатчика для відстеження нагрівання двигуна;
- модуля Sd-карти для автономного запису даних;
- кутоміра для стендів зі змінюваним кутом атаки гвинта.

Такий потенціал до адаптації та модифікації відповідає сучасним вимогам до лабораторного устаткування, а також дозволяє використовувати стенд як модульну платформу в більш масштабних дослідженнях і розробках.

Висновки

У даній роботі представлена розробка компактного і доступного випробувального стенда для тестування одиночних гвинтів міні- і мікро- безпілотних літальних апаратів.

Запропонована конструкція відрізняється високою мобільністю, простотою складання, модульністю та можливістю розширення. Завдяки використанню недорогих, але точних вимірювальних компонентів і сучасних мікроконтролерів, установка забезпечує надійне і відтворюване вимірювання основних параметрів гвинта — тяги, струму й напруги — у широкому діапазоні режимів.

Експериментальні випробування підтвердили коректність роботи стенда – отримані залежності відповідають теоретичним моделям, а відхилення між повторами вимірювань не перевищують 5%. Серед протестованих гвинтів найбільш ефективним по тязі й енергетичним показникам виявився 8-дюймовий, що демонструє практичну користь установки для інженерного підбору компонентів у реальних завданнях проектування БПЛА.

Розробка поєднує в собі ідеї, запропоновані в науковій літературі [1, 5, 9, 10], і в той же час пропонує нове рішення, орієнтоване на доступність і гнучкість. Стенд може використовуватися в навчальних лабораторіях, дослідницьких проектах, а також при інженерному відлагодженні й порівнянні повітряних гвинтів на ранніх етапах проектування дронів.

У подальших дослідженнях планується розширення функціональності стенда — додавання вимірювання частоти обертання, температури і вібрацій, а також реалізація PID-керування двигуном. Крім того, перспективним напрямком є розробка модуля з регульованим кутом атаки лопатей для вивчення гвинтів зі змінним кроком, а також платформи для одночасного тестування декількох гвинтів.

Внесок авторів: формулювання проблеми – **М.В. Борисюк, Я.О. Рудкін**; огляд та аналіз інформаційних джерел – **М.В. Борисюк**; розробка дослідницького стенда – **Я.О. Рудкін**; верифікація дослідницького стенда, аналіз результатів верифікації – **Я.О. Рудкін**; аналіз результатів апробації – **М.В. Борисюк**.

Конфлікт інтересів

Автори заявляють, що немає конфлікту інтересів щодо цього дослідження, фінансового, особистого, авторського чи іншого, який міг би вплинути на дослідження та його результати, представлені в цій статті.

Фінансування

Дослідження проводилося без фінансової підтримки.

Наявність даних

Робота не має супутніх даних.

Використання штучного інтелекту

Автори підтверджують, що вони не використовували методи штучного інтелекту при створенні представленої роботи.

Усі автори прочитали та погодилися з опублікованою версією рукопису

Література

1. A test-bench for battery-motor-propeller assemblies designed for multirotor vehicles [Text] / G. Avanzini, A. Nisio, A.M.L. Lanzolla, & D. Stigliano // IEEE 7th International Workshop on Metrology for AeroSpace (MetroAeroSpace). – 2020. – 6 p.

2. Prasetiyo, E. E. A Simple Brushless Motor and Propeller Test Stand for Experiment from Home [Text] / E. E. Prasetiyo // 4th International Conference on Electrical, Electronics, Informatics, and Vocational Education. Yogyakarta, Indonesia. – 2021. – № 2111. – 7 p.

3. Experimental study on efficient propulsion system for multicopter UAV design applications [Text] / S. Goli, D. F. Kurtulus, L. M. Alhems, & et al. // Results in Engineering. – 2023. – № 20. – 18 p.

4. Multi-Body Dynamics Analysis of UAV Propeller Testing Fixture [Text] / E. Vinayaka, V. E. Bodur, & et al. // International Research Journal of Engineering and Technology. – 2025. – Vol. 12, № 03. – P. 967-974.

5. Siddiqi, Z. Experimental and numerical study of novel Coanda-based unmanned aerial vehicle [Text] / Z. Siddiqi, W. Jin, & J. W. Lee // Journal of Engineering and Applied Science. – 2022. – № 76. – 19 p.

6. Schmal, J. Development of a UAV Test Stand [Електронний ресурс] / J. Schmal, D. W. Herrin, & D. Fernandez Comesana // In Proceedings of Intern-Noise. – 2023. Режим доступу: https://www.microflown.com/resources/scientific-papers/development-of-a-uav-test-stand (accessed 12.05.2025).

7. Test Stand for Propellers and Rotors in VTOL Drone Systems [Text] / M. Wojtas, P. Wyszkowski, M. Mądro, & M. Osiewicz // Transactions on Aerospace Research. – 2023. – №. 1. – P. 67-85.

8. Designing and Testing a Test Stand to Evaluate the Performance of a Custom-built Drone [Text] / G. Guclu, H. H. Tran, E. T. Nguyen, & et al. // AIAA 2024-84596. Regional Student Conferences. – 2024. – 9 p.

9. Sanliturk, M. Designing, implementation of test bench with pid control for variable pitch propeller system [Електронний ресурс] / M. Sanliturk., & M. Bayraktar // Uluslararası Mühendislik Mimarlik ve Tasarım Kongresi. – 2019. Режим доступу: https://www.researchgate.net/publication/338854455_designing_implementation_of_test_bench_with_pid_control_for_variable_pitch_propeller_system (accessed 12.05.2025).

10. Experimental Measurement of a UAV Propeller [Text] / P. Kosa, M. Kisev, V. Vacho, & et al. // Tehnicki vjesnik - Technical Gazette. – 2022. – Vol. 29, №. 1. – P. 73-80.

11. An Experimental Study to Investigate the Effect of the Angle of Attack on VToL UAV Propellers [Text] / F. Akkoyun, I. Bogrekci, P. Demircioglu, & S. Vardin. // IFAC-PapersOnLine. – 2018. – № 51. – P. 441–445.

12. Ganesan, T. Aerodynamic Analysis of Mathematically Modelled Propeller for Small UAV Using CFD in Different Temperature Conditions [Text] / T. Ganesan, & N. Jayarajan // Journal of Mechanical Engineering. – 2023. – № 11-12. – P. 444-454.

13. Santos, D. Generalized Thrust Estimation and Control Approach for Multirotors Micro Aerial Vehicles [Text] / D. Santos, M. Saska, & T. A. Nascimento // IEEE Robotics and Automation Letters. – 2024. – Vol. 9, № 10. – P. 8889-8896.

14. Lin, X. Propeller flow field simulation analysis and structure optimization of multi-rotor UAV [Text] / X. Lin, & J. Yan // Journal of Physics: Conference Series. – 2023. – № 2569. – 9 p.

References

1. Avanzini, G., Nisio, A., Lanzolla, A. M. L., Stigliano, D. A test-bench for battery-motor-propeller assemblies designed for multirotor vehicles. *IEEE 7th International Workshop on Metrology for AeroSpace (MetroAeroSpace)*, 2020. 6 p. doi: 10.1109/MetroAeroSpace48742.2020.9160320.

2. Prasetiyo, E. E. A Simple Brushless Motor and Propeller Test Stand for Experiment from Home. *4th International Conference on Electrical, Electronics, Informatics, and Vocational Education. Yogyakarta, Indonesia*, 2021, vol. 2111. 7 p. doi: 10.1088/1742-6596/2111/1/012005.

3. Goli, S., Kurtulus, D. F., Alhems, L. M., Memon, F. M., & Imran, H. I. Experimental study on efficient propulsion system for multicopter UAV design applications. *Results in Engineering*, 2023, vol. 20. 18 p. doi: 10.1016/j.rineng.2023.101555.

4. Vinayaka, E., Bodur, V. E., Fatima, F., Lore, S., & Tengli, P. N. Multi-Body Dynamics Analysis of UAV Propeller Testing Fixture. *International Research Journal of Engineering and Technology*, 2025, vol. 12, no. 03, pp. 967-974.

5. Siddiqi, Z., Jin, W., & Lee, J. W. Experimental and numerical study of novel Coanda-based unmanned aerial vehicle. *Journal of Engineering and Applied Science*, 2022, no. 76. 19 p. doi: 10.1186/s44147-022-00120-5.

6. Schmal, J., Herrin, D. W., & Fernandez Comesana, D. Development of a UAV Test Stand. *In Proceedings of Intern-Noise*, 2023. Available at:

ISSN 1814-4225 (print)
ISSN 2663-2012 (online)

https://www.microflown.com/resources/scientific-papers/development-of-a-uav-test-stand. (accessed 12.05.2025).

7. Wojtas, M., Wyszkowski, P., Mądro, M., & Osiewicz, M. Test Stand for Propellers and Rotors in VTOL Drone Systems. *Transactions on Aerospace Research*, 2023, no. 1, pp. 67-85. doi: 10.2478/tar-2023-0006.

8. Guclu, G., Tran, H. H., Nguyen, E. T., Singh, M., & Zaidi, S. H. Designing and Testing a Test Stand toEvaluate the Performance of a Custom-built Drone. *AIAA 2024-84596. Regional Student Conferences. January 2024.* 9 p. doi: 10.2514/6.2024-84596.

9. Sanliturk, M., & Bayraktar, M. Designing, implementation of test bench with pid control for variable pitch propeller system. *Uluslararası Mühendislik Mimarlik ve Tasarım Kongresi*. *Istanbul, Turkey*, 2019. Available at: https://www.researchgate.net/publication/338854455_designing_implementation_of_test_bench_with_pid_control_for_variable_pitch_propeller_system. (accessed 12.05.2025).

10. Kosa, P., Kisev, M., Vacho, V., Toth, V., Olejar, M., Harnicarova, M., Valicek, J., & Tozan, H. Experimental Measurement of a UAV Propeller. *Tehnicki vjesnik - Technical Gazette*, 2022, vol. 29, no. 1, pp. 73-80. doi: 10.17559/TV-20201212185220.

11. Akkoyun, F., Bogrekci, I., Demircioglu, P., & Vardin. S. An Experimental Study to Investigate the Effect of the Angle of Attack on VToL UAV Propellers. *IFAC-PapersOnLine*, 2018, vol. 51, pp. 441–445. doi: 10.1016/J.IFACOL.2018.11.322.

12. Ganesan, T., & Jayarajan, N. Aerodynamic Analysis of Mathematically Modelled Propeller for Small UAV Using CFD in Different Temperature Conditions. *Journal of Mechanical Engineering*, 2023, no. 11-12, pp. 444-454. doi: 10.5545/sv-jme.2023.601.

13. Santos, D., Saska, M., & Nascimento, T. A. Generalized Thrust Estimation and Control Approach for Multirotors Micro Aerial Vehicles. *IEEE Robotics and Automation Letters*, 2024, vol. 9, no. 10, pp. 8889-8896. doi: 10.1109/LRA.2024.3433749.

14. Lin, X., & Yan, J. Propeller flow field simulation analysis and structure optimization of multi-rotor UAV. *Journal of Physics: Conference Series*, 2023, vol. 2569. 9 p. doi: 10.1088/1742-6596/2569/1/012040.

Надійшла до редакції 12.06.2025, розглянута на редколегії 18.08.2025

COMPACT STAND FOR TESTING SINGLE PROPELLERS OF MINI- AND MICRO- UNMANNED AERIAL VEHICLES

Maksym Borysiuk, Yakiv Rudkin

This paper presents the development of a stand for the experimental testing of single propellers designed for mini- and micro-unmanned aerial vehicles (UAVs). Due to the widespread use of small drones in civil, scientific, and defense applications, the aerodynamic and energy characteristics of propellers, which significantly affect flight efficiency, control stability, and battery life, must be accurately determined. This study aimed to create a compact experimental stand with affordable components that can record the main parameters – thrust, current, voltage – and ensure sufficient accuracy and reproducibility of the results. The test bench is built using a 3D-printed polymer frame, which ensures the structure's lightness and rigidity. A brushless electric motor is used as the motor, and a strain gauge, a current shunt, and a voltage sensor are used for measurements. A microcontroller reads the data and displays it in real time, which simplifies analysis and calibration. A series of experiments were conducted with propellers of three diameters (7, 8, and 10 inches), during which the dependence of thrust and current on the number of revolutions was recorded. The 8-inch propeller demonstrated the optimal thrust-to-power consumption ratio, which is useful for choosing a propeller in the design of mini-UAVs. The repeatability of the results for the main parameters was no more than 5%, indicating the measuring system's reliability. A comparative analysis with similar developments allows us to conclude that the proposed design combines the following important features: simplicity, accessibility, modularity, and sufficient accuracy. Thus, the testbed can be effectively used in research laboratories, in educational processes, and in the design and debugging of mini- and micro-UAVs. Future development prospects include expanding the functionality by integrating speed, temperature, and vibration sensors and creating a system with an adjustable blade angle of attack for studying variable-pitch propellers.

Keywords: unmanned aerial vehicle; stand; testing; thrust; voltage; propeller; aerodynamic characteristics; compact.

Борисюк Максим Вячеславович – асп. каф. авіаційних двигунів, ДНП Державний університет «Київський авіаційний інститут», Київ, Україна.

Рудкін Яків Олександрович – асп. каф. авіаційних двигунів, ДНП Державний університет «Київський авіаційний інститут», Київ, Україна.

Maksym Borysiuk – PhD Student of the Department of Aviation Engine, State University "Kyiv Aviation Institute", Kyiv, Ukraine, e-mail: max.borysyuk@gmail.com, ORCID: 0009-0005-3015-5753.

Yakiv Rudkin – PhD Student of the Department of Aviation Engine, State University "Kyiv Aviation Institute", Kyiv, Ukraine, e-mail: v8@ukr.net, ORCID: 0009-0000-5950-1609.