

УДК 533.662.2

*П.В. Сизоненко, студент гр. ПП-61м, д.т.н., доц. Нікітін О.К.
НТУУ «КПІ ім. Ігоря Сікорського»*

ОГЛЯД І АНАЛІЗ РОБІТ ПО ЕКСПЕРЕМЕНТАЛЬНОМУ ВИЗНАЧЕННЮ ТЯГИ ПОВІТРЯНИХ ГВИНТІВ

Анотація. Дана стаття представляє собою огляд і аналіз робіт та дослідів, у яких було проведено експериментальне визначення тяги повітряних гвинтів.

Ключові слова: квадрокоптер, мультикоптер, повітряний гвинт, пропелер, тяга, швидкість обертання.

ВСТУП

На сьогоднішній день використання квадрокоптерів у різноманітних сферах людської діяльності стало нормою. Від простих моделей для розваг до військових розвідувальних дронів. Мультикоптери використовуються для доставки різноманітних товарів та вантажів, а тому важливою задачею є покращення тягових можливостей, наприклад за рахунок покращення характеристик повітряних гвинтів невеликих розмірів. За останні роки авіації було проведено багато досліджень на повітряних гвинтах для повномасштабних літальних апаратів, але по пропелерах, які використовуються для мультикоптерів даних дуже мало. Можливо у майбутньому квадрокоптери зможуть служити як повітряний транспорт для перевезення пасажирів та вантажів. Наприклад мультикоптери можна використовувати для доставки техніки спеціального призначення на поле бою або у важкодоступні місця, або для евакуації людей чи техніки з місць катастроф або аварій. Уже зараз проводяться тестування перших прототипів. Отже пропелер також повинен мати достатню міцність, адже навантаження на нього буде збільшуватись в залежності від величини вантажу та висоти на яку необхідно летіти.

ОГЛЯД І АНАЛІЗ РОБІТ

Пропелерні характеристики при низьких числах Рейнольдса стають дедалі важливішими у прогнозуванні дизайну та продуктивності мультикоптерів. Хоча продуктивність повітряного гвинта для повномасштабних літаків була добре задокументована з перших днів авіації, дані про пропелери невеликих габаритів дуже дефіцитні. Випробування проведені Бейлі (Bailey, J. E., 1978) на семи дерев'яних пропелерах марки Top Flite для моделей літаків діаметром від 228 до 356 міліметрів, показали, що ефективність таких пропелерів від 7.5% до 15% нижча ніж ефективність таких же по формі тридцяти 914 міліметрових пропелерів, які були випробувані Дюрандом (Durand, W. F., 1923). Подібна деградація в продуктивності пізніше була виміряна Басом (Bass, R. M., 1986) для пропелерів більших ніж 610 міліметрів а також Ассон і Данном (Asson, K. M. & Dunn, P. F., 1992), які демонстрували також характеристику на двох дерев'яних 356 міліметрових пропелерах Zinger для моделей літаків. В цей же період часу Мерчант та Міллер (Merchant, M. P. & Miller, L. S., 2006) провели випробування на 30 моделях гвинтів літаків радіусом від 152 до 558 міліметрів, але лише на семи пропелерах було встановлено таку саму залежність. Нещодавно Ол (Ol, M., Zeune, C., & Logan, M., 2008)

провів випробування на великій кількості пропелерів, які використовуються на безпілотних літальних апаратах, і зробив детальні порівняння з аналізом, виявивши важливість впливу низьких чисел Рейнольдса. Ці недавні вимірювання пропелерів невеликих габаритів та результати які зазначено у вище приведених дослідженнях, були мотивовані однаковими інтересами в документації, систематизації та розширення знань аеродинамічних можливостей пропелерів невеликих габаритів, що використовуються у мультикоптерах та подібних безпілотних літальних апаратах.

В Університеті штату Іллінойс Урбана-Шампань, Сполучені Штати Америки було проведено випробування 79 пропелерів, більшість яких мають радіуси у діапазоні від 228 до 280 міліметрів. Під час тестів швидкість пропелера була фіксована, у той час як змінювалась швидкість потоку повітря в аеродинамічній трубі для отримання режиму вітряка(нульова тяга). Було перевірено ефективність двигунів на низьких числах Рейнольдса. Щоб перевірити вплив чисел Рейнольдса, як правило використовувались чотири швидкості обертання в діапазоні від 1500 до 7500 обертів на хвилину, в залежності від діаметру пропелера. Ефективність пропелерів значно варіювала від піку біля 0.65 (ефективний пропелер) до 0.28 (дуже поганий пропелер). Таким чином, ці результати вказують на те, що належний вибір пропелерів для квадрокоптерів може суттєво вплинути на ефективність повітряних судин. Тести приведені у дослідженні були виконані на експериментальному стенді в аеродинамічному тунелі. Максимальна швидкість повітря в аеродинамічному тунелі сягала 24.4 метри на секунду. Інтенсивність турбулентності для змінюваної швидкості потоку повітря в тунелі вимірювалась за допомогою теплоанометра. Вимірювання тяги було здійснено за межами тунелю за допомогою маятника Т-подібної структури, що повертається на двох гнучких стежнях, при цьому обмежується елементом навантаження поза межами тунелю. Щоб переконатись, що вільно спрямований потік не спричиняє сили тяги на балку, що розташована в середині тунелю було використано максимально обтікаєм форму даного кріплення. Для вимірювання швидкості обертання пропелера використовувався фотореєстратор, для підрахунку кількості обертів вихідного валу за фіксований інтервал часу (0.75 с). Також у аеродинамічній трубі вимірювався швидкість потоку за допомогою труби з'єднаної з перетворювачем тиску. Вимірювались динамічний та атмосферний тиски. Вимірювання швидкості повітряних гвинтів велось з дуже високою частотою (20000 Гц), щоб забезпечити максимально точний запис сигналу від фотореєстратора (максимальна похибка складає 0.1%). Була протестована велика кількість різних стилів пропелерів, деякі з них призначені для використання на моделях літаків та мультикоптерах з електродвигунами, а деякі для моделей з двигунами які працюють на паливі. Завдяки такому широкому спектру випробуваних повітряних гвинтів був отриманий широкий діапазон характеристик продуктивності та тягових можливостей. В представленій роботі висвітлюються загальні тенденції, що виявляються в даних, а також тенденції в силі тяги та коефіцієнті потужності, та загальна ефективність пропелерів. Дивлячись на весь набір даних спостерігається одна явна залежність (прої-

люстрована графіками) – при збільшенні швидкості обертання повітряного гвинта, продуктивність покращується. Ступінь покращення варіює в залежності від типу пропелера та його характеристик, але тенденція є послідовною. Таке покращення також спостерігається в графіках тяги двигуна, так як підвищення коефіцієнтів тяги спостерігаються при збільшенні швидкості обертання повітряних гвинтів. Покращення продуктивності при збільшенні швидкості пропелера є очікуваною тенденцією, оскільки збільшуються числа Рейнольдса.

У досліді були випробувані три типи «ACP» пропелерів, а саме «Slow Flyer», «Sport» та «Thin Electric». Повітряні гвинти «Slow Flyer» та «Thin Electric» були розроблені спеціально для використання тільки на електродвигунах. Пропелери «Sport» були розроблені для того щоб витримувати збільшену тягу, яка виробляється двигуном внутрішнього згорання. Профіль пропелерів «Slow Flyer» досить тонкий з гострим переднім краєм, а двох інших видів пропелерів товсті профілі з круглими краями. Всі пропелери «ACP» демонструють певні зміни в кривих продуктивності, що відповідають загальним тенденціям. Пропелери «Slow Flyer» показують найменшу варіативність в ефективності. Пропелери «Sport» демонструють найбільшу дисперсію на протязі усього діапазону вимірювань. Пропелери «Thin Electric» показують схожу до «Slow Flyer» ситуацію. Була виявлена одна цікава тенденція в коефіцієнтах тяги та потужності пропелера «Thin Electric» - видно що різниця в цих коефіцієнтах різко збільшується наближаючись до піку ефективності. Також було протестована чотири типи пропелерів «Graupner», а саме «CAM», «CAM Slim», «Slim», «Super Nylon». Перші три призначені спеціально для використання з електродвигунами, а останній тип спеціально для моделей з двигунами внутрішнього згорання. Пропелери «CAM», «Super Nylon» спроектовані з помірно потовщеними профілями лопатей та закрученими ведучими краями, а в свою чергу «CAM Slim» та «Slim» були спроектовані з більш тонким профілем лопатей із загостреними краями. Пропелери «CAM» демонструють значні розбіжності в кривих залежності ефективності від швидкості обертання. Пропелери «CAM Slim» та «Slim» демонструють незначні відмінності на піках ефективності, а пропелери «Slim» взагалі демонструють найменше коливання в графіках залежності ефективності від швидкості обертання. Пропелери «CAM Slim» демонструють незначні відмінності в графіках залежності сили тяги та швидкості обертання на піках ефективності. Пропелери «Super Nylon» демонструють помірні відмінності в графіках залежності ефективності від швидкості обертання, з підвищенням різниць на піках ефективності. Ще було перевірено два типи пропелерів «GWS», а саме «Direct Drive» та «Slow Flyer», обидва з яких призначені для використання з електродвигунами. Пропелери «Direct Drive» призначені для роботи на більш високих швидкостях обертання, в свою чергу пропелери «Slow Flyer» призначені для двигунів з меншою швидкістю обертання. Обидва типи пропелерів розроблені з тонким профілем крила та гострими ведучими краями. Пропелери «GWS Direct Drive» демонструють помірні варіації на графіках залежності ефективності від швидкості обертання, а пропелери «Slow Flyer» демонстру-

ють мінімальні зміни ефективності на протязі всього діапазону зміни частоти обертання. Якщо подивитись на дані пропелера «GWS Direct Drive» то можна побачити що співвідношення у ефективності та тяги до швидкості обертання відрізняються від пропелерів інших виробників, наведених вище. У попередніх випадках збільшення швидкості обертання гвинта збільшувало і його ефективність і тягу в різній мірі, а пропелери «GWS Slow Flyer» мають значно менші значення ефективності та тяги і при цьому потребують меншої потужності двигуна для обертання. Отримані дані та залежності можуть бути використані для покращення конструкцій пропелерів що використовуються у різного типу мультикоптерах та полегшення проєктування повітряних гвинтів невеликих розмірів.

ВИСНОВКИ

Отже, виходячи з представлених у дослідженні даних можна зробити висновки, що для збільшення ефективності і тяги пропелер повинен мати достатньо широкий профіль крила та закручені ведучі краї лопаті. Також збільшення тяги спостерігається зі збільшеннями швидкості обертання пропелера, отже кріплення та самі пропелери повинні мати дуже високу міцність щоб не руйнуватися при експлуатації. Але даних на сьогоднішній день є не так багато, тому подібні дослідження є важливими, в тому числі і в Україні, адже за мультикоптерами майбутнє.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Brandt, J., & Selig, M. (2011). Propeller performance data at low reynolds numbers. In *49th AIAA Aerospace Sciences Meeting including the New Horizons Forum and Aerospace Exposition* (p. 1255).
2. Durand, W. F. (1918). Experimental research on air propellers.
3. Bass, R. (1986). Small scale wind tunnel testing of model propellers. In *24th Aerospace Sciences Meeting* (p. 392).
4. Asson, K. M., & Dunn, P. F. (1992). Compact dynamometer system that can accurately determine propeller performance. *Journal of Aircraft*, 29(1), 8-9.
5. Merchant, M., & Miller, L. S. (2006, January). Propeller performance measurement for low Reynolds number UAV applications. In *44th AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit* (p. 1127).
6. Ol, M., Zeune, C., & Logan, M. (2008, August). Analytical/Experimental Comparison for Small Electric Unmanned Air Vehicle Propellers. In *26th AIAA Applied Aerodynamics Conference* (p. 7345).