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

УДК 629.7.035.7 **doi: 10.32620/aktt.2025.4sup1.09**

М. С. КУЛИК, Ф. І. КІРЧУ, Л. Г. ВОЛЯНСЬКА, І. Г. БАБІЧЕВ

Державний університет "Київський авіаційний інститут", Україна

ЕФЕКТИВНІСТЬ ТАНДЕМНИХ ТЯГОВИХ ВЕНТИЛЯТОРІВ БПЛА З ТОРОЇДАЛЬНО-СПІРАЛЬНОЮ ОБ'ЄДНУЮЧОЮ ЗАКІНЦІВКОЮ ЛОПАТЕЙ

Безпілотні літальні апарати (БПЛА) стають усе більш затребуваними як у цивільних, так і у військових місіях. Особливо це стало очевидним під час ведення бойових дій з окупаційними військами російської федерації, коли в багатьох випадках переваги на полі бою вдається досягти якраз за допомогою БПЛА. Однак у БПЛА є головний недолік, який заважає їх широкому використанню – високий рівень шуму, створюваного тяговими вентиляторами. Однак конструктивне зменшення шуму вентилятора призводить до зменшення його продуктивності. При цьому найбільший шум створює вихоровий зрив на кінцях лопатей, сила якого, в свою чергу, залежить від діаметра лопаті, оскільки вихоровий шум (рівень акустичної потужності APL) залежить від швидкості перерізу лопатей в шостому степеню. Тобто зменшуючи діаметр і збільшуючи кількість лопатей, ми можемо значно зменшити рівень акустичної потужності. Але зменшення діаметра призведе до зниження продуктивності вентилятора. Тому в останній час усе частіше звертаються до конструкції тороїдальних вентиляторів. Тороїдальна форма допомагає мінімізувати вихор на кінцях лопатей, обмежуючи потік і контролюючи крайові перетікання. Але внаслідок нелінійної залежності між кутом установки лопаті й продуктивністю, установка кроку в тороїдальних вентиляторах є дуже складним процесом. Окрім того, технологічність виробництва таких конструкцій залишається складною проблемою. Тому автори поставили собі за мету об'єднати переваги класичної схеми вентилятора з перевагами тороїдального в одній конструкції й оцінити результати, не втративши при цьому продуктивність. З метою різкого зменшення діаметра (при практично тій же продуктивності) запропоновано тандемну схему вентилятора з тороїдально-спіральною об'єднуючою закінцівкою лопатей. Порівняльний аналіз двох схем (тороїдальної та класичної тандемної) з об'єднуючою тороїдально спіральною закінцівкою лопатей проводився на спеціально створеній установці за нормалізованими значеннями коефіцієнтів ефективності, коефіцієнта потужності і коефіцієнта тяги. Окрім того, оцінювався рівень акустичної потужності APL шумового вихору. Порівняння піятилопатевого тандемного вентилятора з тороїдально-спіральною закінцівкою з п'ятилопатевим тороїдальним вентилятором показало, що при значно більшій продуктивності рівень акустичної потужності був практично однаковим (при однаковому діаметрі вентиляторів і частоті обертання).

Ключові слова: *повітряний гвинт; дворядні лопаті; тандемний гвинт; тороїдальний вентилятор; геометричні параметри; тяга гвинта; БПЛА.*

Вступ

До повітряних гвинтів сучасних літальних апаратів (зокрема БПЛА) пред'являються високі вимоги щодо покращення аеродинамічних характеристик у широкому діапазоні умов експлуатації: по загальній масі, допустимому рівню шуму та забезпеченні необхідного діапазону швидкостей польоту.

Одним із перспективних методів підвищення аеродинамічного навантаження на лопаті гвинта є застосування гвинтів з тандемними лопатями. Гвинти з такими лопатями займають середнє положення між однорядними та дворядними контробертовими гвинтами. До недавнього часу такі конструкції в авіації практично не використовувались.

В основному це було пов'язано із значним рівнем шуму та складністю конструкції об'єднуючої втулки для забезпечення зміни кроку гвинта та значними кінцевими втратами.

Тому такі гвинти застосовувались, в основному, в морських конструкціях рушіїв. Однак у зв'язку з масовим застосуванням БПЛА (що дає безперечні переваги в бойових умовах) з'явилась нагальна необхідність у збільшенні швидкості польоту малорозмірних літальних апаратів.

Звідси і підвищений інтерес до тандемних гвинтів (тягових вентиляторів), які за певних умов дозволяють вирішувати цю проблему.

До того ж (особливо для дешевих апаратів одноразового використання), відпадає необхідність у регулюванні кроку обох рядів лопатей, що значно спрощує саму конструкцію ротора [1, 2].

Можна значно знизити інтенсивність кінцевих втрат (і шуму) на лопатях дворядного вентилятора за рахунок об'єднуючої спіральної закінцівки лопатей з одним вихором низької інтенсивності на відміну від

Creative Commons Attribution NonCommercial 4.0 International

течії з двома потужними вихорами однієї спрямованості (обидва ряди лопатей мають один напрям обертання і розташовані на одній втулці [1, 2]).

Проведені попередні дослідження (зокрема дослідження, виконані організаціями армії США та приватними компаніями [3,4]) показали, що при раціональному розташуванні лопатей першого і другого ряду вдається досягти зниження рівня шуму на 10 - 12Dba. Тяга таких гвинтів в середньому на 30-40 % вище, ніж в еквівалентних за діаметром та частотою обертання однорядних гвинтів.

Однак для досягнення таких результатів необхідно досить ретельно здійснювати вибір осьової відстані та кутового положення між лопатями першого та другого ряду.

В роботі [5] показано, що найбільшого приросту тяги можна досягти при рівних діаметрах першого та другого ряду гвинтів лопатей.

При цьому приріст тяги сягає 40-45%. Маючи беззаперечний приріст тяги, ми все ж таки програємо за рівнем шуму.

Цю проблему можна вирішити конструктивно використовуючи, наприклад, тороїдальні вентилятори, зменшуючи діаметр вентилятора, взаємне розташування першого та другого ряду тандемних вентиляторів ,профілюванням лопатей тощо. Але у більшості випадків різке зменшення шуму призводить до втрати продуктивності вентилятора [3, 4, 5, 6].

Значний інтерес в останній час зосереджено на дослідженні тороїдальних гвинтів [6, 7], які дозволяють значно знизити шум на фоні збереження заданого рівня тяги у порівнянні з традиційними вентиляторами.

Постановка задачі дослідження та методи її розв'язання

Підходячи до вирішення задачі зниження рівня шуму дослідники повинні вибирати поміж однорядними традиційними вентиляторами, дворядними тандемними і тороїдальними, часто віддаючи перевагу тороїдольним. А якщо не вибирати, а обїєднати, тобто в конструкцію лопатей тандемних вентиляторів класичного профілювання ввести тороїдально-спіральну об'єднуючу закінцівку (рис.1).

Таке рішення дозволяє переваги тороїдальних вентиляторів щодо зменшення рівня шуму перенести в конструкцію традиційних тандемних вентиляторів за рахунок застосування тороїдально-спіральних об'єднуючих закінцівок лопатей. При цьому кінчик верхнього ряду лопатей загинається (закручується) в кінчик лопатей другого ряду. Така конструкція дозволяє звести до мінімуму лобовій опір закручених повітряних вихорів, створених закінцівками лопатей і підвищити загальну жорсткість вентилятора. Тобто ми отримуємо один вихор низької інтенсивності на відміну від течії з двома потужними вихорами однієї спрямованості (обидва ряди лопатей мають один напрям обертання і розташовані на одній втулці).

Рис. 1. Тандемний вентилятор з тороїдально-спіральною об'єднуючою закінцівкою лопатей

Канальні вентилятори генерують ще більшу статичну тягу в порівнянні з відкритим вентилятором того ж діаметра і потужності навантаження. Окрім того, жорсткий канал є елементом безпеки, захищаючи лопаті від пошкодження сторонніми предметами, а також персонал від травм лопатями. До того ж канальні вентилятори мають беззаперечні переваги з точки зору зменшення шуму і керування вектором тяги.

Виходячи с того, що тяга вентилятора не завжди постійна і залежить, зокрема, від швидкості обертання ротора і швидкості вхідного потоку, у процес випробування вентиляторів часто включають перевірку їх продуктивності і ефективності в різноманітних умовах експлуатації [6, 7]. Тому оптимізація продуктивності і енергоефективності проводилася за допомогою аналізу зміни геометрії вентилятора і його аеродинамічних параметрів.

Продуктивність вентилятора традиційно аналізувалася на основі нормалізованих коефіцієнтів, таких як ефективність (η), коефіцієнт потужності (C_p) і коефіцієнт тяги ($C_т$), які розраховуються за допомогою низки рівнянь

$$C_т = \frac{T}{\rho n^2 D^4}, \qquad C_p = \frac{P}{\rho n^3 D^5}, \qquad \eta = \frac{TV}{P}, \qquad (1)$$

де P і T представляють потужність (Вт) і тягу (Н) відповідно; D^n – діаметр гвинта (м); n - частота обертання (об/с); ρ – щільність повітря (кг/м^3); V – швидкість транспортного засобу (м/с), рушієм якого є вентилятор (гвинт).

З виразу для η видно, що коли швидкість V підходить до нуля, ефективність гвинта також наближається до нуля, а тяга гвинта стає статичною тягою.

Рівняння (1) широко застосовуються дослідниками, виходячи з простоти і точності вимірювання параметрів, які входять до них. Тому попередній

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

аналіз продуктивності і енергоефективності кожного гвинта з модельного ряду перед стендовими випробуваннями проводився за їх допомогою.

Необхідно також зазначити, що попередні дослідження вентиляторів різної модифікації (рис.1, рис.2), в тому числі традиційних, показали, що найбільш ефективними обтічниками втулки гвинта є обтічники овальної форми (рис.3), які і використовувались в подальших дослідженнях.

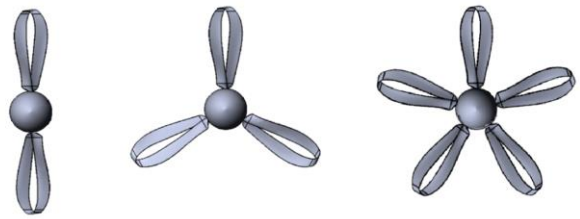

Рис.2. Зовнішній вигляд тороїдальних вентиляторів модельного ряду

Шум вентилятора складається з двох основних компонентів: вихорового (широкополосного) і обертового (тонального) шумів. Широкополосний (вихоровий) шум виникає на кінцях лопатей, їх передніх кромок, турбулентності вільного вихора повітряного потоку і відривних потоків.

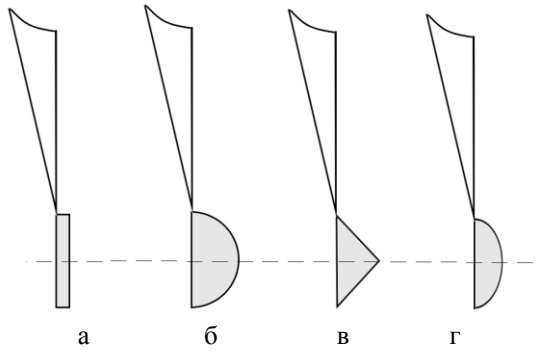

Рис. 3. Форми обтічників втулки багатолопатевих вентиляторів:
а – пласка; б – кругла; в – конічна; г – овальна

Під час обертання лопаті створюють градієнт швидкості від втулки до кінцівки, що призводить до широкого діапазону частот зривання, пов’язаних з вихоровим зривом. Сила цих зривів прямо пропорціональна вихоровому шуму. Усі звуки, які пов’язані з гармоніками частоти обертання лопаті, складають обертовий шум. З підвищенням частоти обертання рівень звукового тиску зменшується.

Загально визнано, що шум вентилятора збільшується зі збільшенням споживаної потужності і його діаметра. В основному це пов’язано зі швидкістю обертання кінцівки лопаті. Рівень поверхневої акустичної потужності (SPL), створеної традиційним вентиляторім (а для подальших досліджень якраз і була вибрана конструкція традіційного дворядного вентилятора з тороїдально-спіральною об’єднуючою закінцівкою лопатей) можна приблизно вирахувати за допомогою формули [8]:

$$SPL=10\log\frac{kA_b(V_{0,7})^6}{10^{-16}},$$

де k - коефіцієнт пропорційності; A_b - площа лопаті; $V_{0,7}$ - швидкість на 0,7 радіуса лопаті.

Тобто вихоровий шум в основному залежить від частоти обертання перерізу кінчика лопаті, оскільки він пов'язаний зі швидкістю перерізу в шостій степені.

Шум, створюваний вентилятором біля втулки (в кореневій частині лопаті) відносно невеликий і постійно збільшується до кінця лопаті, досягаючи там максимуму. Об’єднуюча тороїдально-спіральна закінцівка, об’єднуючи потужні кінцеві вихори в один малої інтенсивності, зменшуючи шум, зберігає тягові характеристики вентилятора за рахунок своєї аеродинаміки. А замінюючи об’єднуючу закінцівку однієї товщини на профільовану – підвищує тягу кінця лопаті.

Дозвукове обертання кінцівки лопаті створює два типи шуму: один– пов'язаний з товщиною лопаті, другий – зі зміною аеродинамічного навантаження на неї [8]. Коли число Маха на кінці лопаті складає 0,6-0,7 М шум навантаження на лопать переважає. Однак зі збільшенням числа Маха шум, викликаний товщиною лопаті, стає значним.

Результати

1. Використання тороїдально-спіральної об’єднуючої закінцівки лопатей тандемного вентилятора дозволяє збільшити ефективність вентилятора на 42-47% відносно однорядного такого ж діаметра і частоти обертання. При цьому рівень акустичного шуму перевищує рівень однорядного усього на 3-4 dB. Це при непрофільованій об’єднуючій закінцівці, тобто профілювання закінцівки може значно покращити результати.

2. Аналіз результатів досліджень над вентиляторами різних модифікацій показав, що серед усіх форм об’єднуючих закінцівок лопатей найефективніші овальна і кругла. Якщо на перший план виходять стійкість і керованість літального апарата (наприклад, робота вентилятора в обмеженому просторі) – рекомендується застосовувати круглу форму закінцівки. Якщо продуктивність – найбільш овальна. Це стосується і форми обтічника втулки вентилятора.

Висновки

Тандемні вентилятори з тороїдально-спіральною закінцівкою мають беззаперечні переваги перед класичними однорядними в продуктивності при одному ж і тому діаметрі, незначно програючи їм у рівні акустичного шуму. Тому подальші зусилля будуть спрямовані не тільки на проблему збільшення тяги (що є безумовним) а, в основному, на проблему зменшення шуму, що в багатьох випадках застосування БПЛА (на полі бою, патрулювання кордонів, виконання спеціальних місій тощо) має вирішальне значення. Звичайно, при одночасному збереженні високих тягових характеристик вентиляторів.

Внесок авторів: формулювання проблеми – **М. С. Кулик**; огляд та аналіз інформаційних джерел – **Л. Г. Волянська, І. Г. Бабічев**; розробка та верифікація дослідницького стенда– **Ф. І. Кірчу**; аналіз результатів – **І. Г. Бабічев**, **Л. Г. Волянська**.

Конфлікт інтересів

Автори заявляють, що у них 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

Рукопис не має пов'язаних даних.

Використання засобів штучного інтелекту

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

Усі автори прочитали та погодилися з опублікованою версією рукопису.

Література

1. *Kulyk, M. A numerical study of performance of the small-size uav pushing tandem propeller with joined blades [Text] / M. Kulyk, F. Kirchu, & H. Hussein// Eastern European Journal of Enterprise Technologies. – 2020. – Vol. 2, № 7(104). – P. 40–48. doi: 10.15587/1729-4061.2020.199486.*

2. *Пат. UA123100C2 Україна. Дворядний повітряний гвинт [Текст] / Кірчу Ф. І. Заявл. 07.02.2018; опубл. 17.02.2020, Бюл. No. 7 – 4 с.*

3. *Leider können wir die von dir gesuchte Seite nicht finden [Електронний ресурс]*. Available at: *https://www.uber.com/at/de/elevate/ (accessed 12.4.2025).*

4. *Cambridge Innovation Institute* [Електронний ресурс]. *Available at: https://internetofbusiness.com/elevate-uber-nasa-us-army (accessed 12.4.2025).*

5. *Schuyler, N. Experimental Approach to the Feasibility of an Axially-Stacked Propeller System. [Text] : M.S. thesis / N. Schuyler // College of Engineering and Applied Science University of Cincinnati, 2014. – 83 p.*

6. *Evaluation of low fidelity and CFD methods for the aerodynamic performance of a small propeller [Text] / E. V. Loureiro, N. L. Oliveira, P. H. Hallak, & et al. // Aerospace Science and Technology. – 2021. – Vol. 108. – Article no. 106402. doi: 10.1016/j.ast.2020.106402.*

7. *Numerical Aerodynamic and Aeroacoustic Analysis of Toroidal Propeller Designs [Text] / Xuan-Duc Vu, Anh-Tuan Nguyen, Tuong-Linh Nha, & et al. // Numerical Aerodynamic and Aeroacoustic Analysis of Toroidal Propeller Designs. – 2024. – P. 20–33. doi: 10.23890/IJAST.vm05is01.0102.*

8. *Seddon, J. Basic Helicopter Aerodynamics, Basic Helicopter Aerodynamics [Text] / J. Seddon, & S. Newman // John Wiley & Sons. – 2011. – 288 p.*

References

1. Kulyk, M., Kirchu, F., & Hanesh, H. A numerical study of performance of the small-size uav pushing tandem propeller with joined blades. *Eastern European Journal of Enterprise Technologies*, 2020, vol. 2, no. 7 (104), pp. 40-48. doi: 10.15587/1729-4061.2020.199486.

2. Kirchu, F. I. *Dvorianyi povitrianyi hvynt* [Double-row air propeller]. Patent UA123100C2, 2020. (in Ukrainian).

3. L*eider können wir die von dir gesuchte Seite nicht finden.* Available at: https://www.uber.com/at/de/elevate/ (accessed 12.4.2025).

4. *Cambridge Innovation Institute*. Available at: https://internetofbusiness.com/elevate-uber-nasa-us-army (accessed 12.4.2025).

5. Schuyler, N. *Experimental Approach to the Feasibility of an Axially-Stacked Propeller System.* College of Engineering and Applied Science University of Cincinnati, 2014. 83 p.

6. Loureiro, E. V., Oliveira, N. L., Hallak, P. H., Bastos, F. de S., Rocha, L. M., Delmonte, R. G. P., & Lemonge, A. C. de C. Evaluation of low fidelity and CFD methods for the aerodynamic performance of a small propeller. *Aerospace Science and Technology*, 2021, vol. 108, article no. 106402, doi: 10.1016/j.ast.2020.106402.

7. Vu, X.-D., Nguyen, A.-T., Nha, T.-L., Chu, H.-Q., Dinh, C.-T. Numerical Aerodynamic and

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

Aeroacoustic Analysis of Toroidal Propeller Designs. *Numerical Aerodynamic and Aeroacoustic Analysis of Toroidal Propeller Designs*. 2024. pp. 20–33. doi: 10.23890/IJAST.vm05is01.0102.

8. Seddon, J., & Newman, S. Basic Helicopter Aerodynamics, Basic Helicopter Aerodynamics. *John Wiley & Sons*, 2011. 288 p.

Поступила в редакцию 20.05.2025, рассмотрена на редколлегии 18.08.2025

EFFICIENCY OF TANDEM UAV PROPULSION FANS WITH TOROIDAL-HELICAL CONNECTED BLADE TIPS

Mykola Kulyk, Fedir Kirchu, Larysa Volianska, Ivan Babichev

Unmanned Aerial Vehicles (UAVs) are increasingly in demand for both civilian and military missions. This has become especially evident during combat operations against the Russian Federation's occupying forces, where battlefield advantages have been achieved precisely through the use of UAVs in many cases. However, UAVs have a major drawback that hinders their widespread use: a high noise level generated by propulsion fans. Attempts to reduce fan noise structurally often decrease fan performance. The greatest source of noise is the vortex shedding at the blade tips, the strength of which, in turn, depends on the blade diameter, as vortex noise (acoustic power level, APL) is proportional to the sixth power of the cross-sectional velocity of the blade. Thus, by reducing the blade diameter and increasing the number of blades, the acoustic power level can be significantly reduced. However, reducing the diameter also decreases the fan performance. Recently, interest in the design of toroidal fans has grown. The toroidal shape helps minimize tip vortices by restricting the flow and controlling edge leakage. However, due to the nonlinear relationship between blade pitch angle and performance, setting the blade pitch in toroidal fans is a very complex process. Furthermore, the manufacturability of such designs remains a significant challenge. Therefore, the authors set themselves the goal of combining the advantages of the classical fan design with those of the toroidal configuration into a single structure and evaluating the results without sacrificing performance. A tandem fan configuration with a toroidal-spiral integrated blade tip was proposed to achieve a sharp reduction in diameter (while maintaining nearly the same performance). A comparative analysis of two configurations (the toroidal and the classical tandem fan) with a toroidal-spiral integrated blade tip was conducted using a specially designed test bench based on normalized efficiency, power, and thrust coefficients. In addition, the acoustic power level (APL) of the vortex noise was assessed. A comparison between a five-bladed tandem fan with a toroidal-spiral integrated tip and a five-bladed toroidal fan showed that the acoustic power level remained nearly identical (with the same fan diameter and rotational speed) despite significantly higher performance.

Keywords: air propeller; double-row blades; tandem propeller; toroidal fan; geometric parameters; propeller thrust; UAV.

Кулик Микола Сергійович – д-р техн. наук, проф. каф. авіаційних двигунів, Державний університет "Київський авіаційний інститут", Київ, Україна.

Кірчу Федір Іванович – канд. техн. наук, доц. каф. авіаційних двигунів, Державний університет "Київський авіаційний інститут", Київ, Україна.

Волянська Лариса Георгіївна – канд. техн. наук, доц. каф. авіаційних двигунів, Державний університет "Київський авіаційний інститут", Київ, Україна.

Бабічев Іван Геннадійович – асп. каф. авіаційних двигунів, Державний університет "Київський авіаційний інститут", Київ, Україна.

Mykola Kulyk – Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department of Aviation Engines, National University "Kyiv Aviation Institute", Kyiv, Ukraine,
e-mail: kulykms@gmail.com, ORCID: 0000-0003-2149-4006, Researcher ID: 2963362.

Fedir Kirchu – PhD, Associate Professor at the Department of Aviation Engines, National University "Kyiv Aviation Institute", Kyiv, Ukraine,
e-mail: fkirchu@gmail.com, ORCID: 0000-0001-8437-4402,

Larysa Volianska – PhD, Associate Professor at the Department of Aviation Engines, National University "Kyiv Aviation Institute", Kyiv, Ukraine,
e-mail: lara.vlv@gmail.com, ORCID: 0000-0001-9651-8776, Researcher ID: 2960907.

Ivan Babichev – PhD Student of the Department of Aviation Engines, National University "Kyiv Aviation Institute", Kyiv, Ukraine,
e-mail: i.babichev@gmail.com, ORCID: 0000-0002-2626-3226.