

УДК 621.45.032.3

doi: 10.32620/aktt.2025.4sup2.04

Л. Г. МАРКОВСЬКА, К. В. БАЛАЛАЄВА, А. А. БАЛАЛАЄВ

*Державне некомерційне підприємство «Державний університет
«Київський авіаційний інститут», Київ, Україна***ОЦІНКА СИЛИ ТЯГИ ПОВІТРЯНИХ ЩІЛИННИХ ГВИНТІВ БПЛА**

Предметом дослідження виступають тягові характеристики щілинних повітряних гвинтів безпілотного літального апарата. **Об'єкт** дослідження - щілинний повітряний гвинт безпілотного літального апарата. **Метою** дослідження є підвищення сили тяги повітряного гвинта безпілотного літального апарата шляхом застосування спеціальних щілин на поверхні лопатей. Для досягнення поставленої мети вирішені наступні **задачі**: розробка моделей повітряних гвинтів зі спеціальними щілинами; проведення числового моделювання обтікання повітряних гвинтів зі спеціальними щілинами в діапазоні частот обертання від 3990 до 6705 об/хв на режимі роботи на землі; аналіз тягових характеристик досліджуваних повітряних гвинтів у заданому діапазоні частот обертання на режимі роботи на землі. Дослідження проводилось для повітряних гвинтів зі спеціальними щілинами, ширина яких становила 2 мм, а довжина – 30% лопаті. Розроблено 8 моделей щілинних гвинтів. Для розрахунку тяги досліджуваних повітряних гвинтів використано числовий експеримент. **Результати**: наявність щілини на лопаті повітряного гвинта впливає на генерацію сили тяги. Також можна відзначити, що впливає не тільки наявність щілини, але й місце її розташування. При наявності щілини на лопатях гвинта в середній частині лопаті при всіх варіантах розташування спостерігається ефект покращення тягової ефективності, але не у всьому діапазоні розглянутих частот обертання гвинта. Представлені результати проведеного дослідження тягової ефективності повітряних щілинних гвинтів безпілотних літальних апаратів показали, що при раціонально підібраних параметрах щілини такий повітряний гвинт може генерувати силу тяги до 21% вище, ніж базовий повітряний гвинт без щілин. Подальшим напрямом дослідження є аналіз нормальної характеристики повітряного гвинта зі щілинами. **Наукова новизна та практична значимість роботи**: вперше досліджені тягові характеристики повітряних щілинних гвинтів для безпілотних літальних апаратів. Отримані результати можуть бути використані при розробці перспективних повітряних гвинтів із підвищеною тяговою ефективністю.

Ключові слова: лопать гвинта; щілина; щілинний гвинт; тяга; числове моделювання; безпілотний літальний апарат; повітряний гвинт; ефективність.

Вступ

Оскільки застосування БПЛА продовжує розширюватися в різних галузях промисловості, включаючи оборону, логістику, сільське господарство та моніторинг навколишнього середовища, виникає потреба підвищення ефективності, надійності та продуктивності безпілотного літального апарату (БПЛА). Поліпшення аеродинамічних характеристик лопатей гвинта БПЛА є одним із сучасних напрямів досліджень авіаційної галузі. До факторів, що впливають на покращення характеристик повітряних гвинтів БПЛА, можна віднести підвищення аеродинамічної ефективності (коефіцієнта корисної дії (ККД)), підвищення тяги, яку створює лопать гвинта та ін.

Таким чином, дослідження та розробка методів вдосконалення конструкцій лопатей повітряних гвинтів БПЛА є актуальним завданням, яке спрямоване на підвищення ефективності БПЛА.

У дослідженні [1] повітряні гвинти дронів оптимізовано з точки зору енергоефективності з урахуванням дискової теорії. Для процесу оптимізації запропоновано нову математичну модель, ефективність запропонованої моделі проаналізовано шляхом порівняння результатів моделювання та фізичного експерименту випробувань повітряного гвинта. У результаті аналізу було встановлено, що енергоефективність гвинта зростає на 11,84% порівняно з даними фізичного експерименту та 11,39% порівняно з результатами моделювання. Підраховано, що високої ефективності можна досягти, застосовуючи запропонований підхід до вирішення інших гвинтових систем.

У [2] представлено альтернативний метод щодо оптимізації геометричних параметрів повітряного гвинта та розрахунку циркуляції вздовж лопаті. Метод використовує вихрову теорію гвинта для аеродинамічних розрахунків і метод точного штрафу для



[Creative Commons Attribution
NonCommercial 4.0 International](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/)

формулювання задачі обмеженої оптимізації як задачі необмеженого нелінійного програмування. Для порівняння використано метод розподілення циркуляції вздовж лопаті гвинта в класичній постановці. Розроблений метод показав хорошу відповідність із точними рішеннями, а саме з потоком без урахування в'язкості та нескінченною кількістю лопатей. Для загального випадку, враховуючи в'язкість і кінцеву кількість лопатей, представлений метод показав кращі результати, ніж метод імпульсної теорії гвинта.

Також теоретичному розрахунку ефективності гвинтів з оптимізацією параметрів за допомогою варіаційного підходу присвячена робота [3]. В цій роботі автори досліджують крім класичних конструкцій повітряних гвинтів, оригінальні конструкції. Вирішення задачі оптимізації ротора в контексті вихрової теорії гвинта було дано Гольдштейном у 1929 році; у цій роботі запропоновано варіаційну постановку цієї задачі. Формулювання полягає в пошуку класу функцій (циркуляція вздовж осі лопаті), для яких функціонали моменту тяги та опору чітко визначені; в роботі доведено, що функціонал строго опуклий і, таким чином, глобальний мінімум існує і він єдиний. Деякі конфігурації аналізуються за допомогою методу Рітца: класична пряма лопать, параболічна лопать, еліптична лопать; порівнюються характеристики гвинтів з різною кількістю лопатей.

Аеродинамічний профіль багато в чому визначає аеродинамічну ефективність лопатей гвинта, тому багато досліджень присвячено вдосконаленню та оптимізації аеродинамічних профілів. Удосконалення функцій штучного інтелекту дозволило в дослідженні [4] інтегрувати алгоритм генерації аеродинамічного профілю на основі GAN, що дозволило отримати аеродинамічний профіль, який має високу аеродинамічну якість для заданих геометричних параметрів.

У науковій статті [5] представлено високоавтоматизований підхід до проектування надкритичного профілю, який називається еволюційним генеративним дизайном (EvoGD). Підхід EvoGD базується на структурі еволюційних обчислень і використовує низку складних генеративних моделей на основі даних, об'єднаних із фізичною інформацією, для ітераційного уточнення початкових форм аеродинамічного профілю, що призводить до покращення аеродинамічних характеристик і зменшення обмежень.

У роботі [6] авторами зроблено спробу виконати зворотне проектування аеродинамічного профілю за допомогою GAN з метою створення форми аеродинамічного профілю, яка при обтіканні повітрям генерує заданий розподіл тиску за заданих умов потоку. Генератор на основі згорткової нейронної мережі розраховує характеристики профілів у вигляді коефіцієнта

тиску та розраховує відповідні координати аеродинамічного профілю. Ці глибокі структури ConvNet усувають проблеми, пов'язані з параметризацією форми аеродинамічного профілю в класичних методах, і генерують шаблони з даних з більш точними даними. У роботі [6] розглядається ефективність трьох розширених генеративних змагальних мережевих архітектур для вирішення задачі генерації координат аеродинамічного профілю. Мережі навчаються на базі даних координат аеродинамічних профілів і розподілу коефіцієнтів тиску.

Однак, як зазначено у [7], геометричні форми аеродинамічних профілів, отримані з порядкових моделей GAN, не є гладкими; отже, для отриманих профілів не представляється можливим проведення подальших досліджень щодо моделювання обтікання. Тому необхідно застосування кривих Без'є або методів згладжування. У дослідженні [7] використовувався умовний GAN Вассерштейна з градієнтним штрафом (cWGAN-gr) для створення гладких форм аеродинамічного профілю без будь-якого методу згладжування. У запропонованому методі модель cWGAN-gr видає координати аеродинамічного профілю, при попередньо заданому коефіцієнту підйомної сили. Потім результати, отримані від запропонованої моделі, порівнюються з результатами порядкових GAN і варіаційних автокодерів; крім того, запропонований метод видає найбільш гладку форму. Отже, запропонований метод генерації координат аеродинамічного профілю не потребує додаткового методу згладжування і дозволяє проводити подальші дослідження з отриманими аеродинамічними профілями.

Використовуючи багаторівневий підхід, властивий ізогеометричному аналізу, у роботі [8] авторами виконується оптимізація структурної форми лопатей гвинтів з однаковими геометричними характеристиками. В результаті остаточно оптимізована модель лопатей гвинта безпосередньо сумісна з CAD.

У роботі [9] представлено підхід до оптимізації параметрів гвинта на основі моделювання, який поєднує стохастичну оптимізацію роїв частинок (PSO) з числовим аеродинамічним і структурним аналізом у шаховому режимі для проектування гвинта. При проектуванні досягається зменшення кількості лопатей гвинта, покращення кривої тягової ефективності та ККД при заданій швидкості польоту. Цільовою функцією оптимізації є максимізація ККД, при заданих обмеженнях по потужності та шуму, рівню вібрації. Проектування включає інтеграцію оптимізованих лопатей у вузол гвинта. При дослідженні лопаті задаються чотирма параметрами: сімейство аеродинамічних профілів, відносна ширини лопаті та хорда на заданих радіусах, закон крутки лопаті.

У дослідженні [10] для проведення числового моделювання обтікання лопатей мікрогвинта використовується метод аналізу взаємодії рідини та структури (FSI), метод кінцевих елементів. Автори використовують підхід динамічної сітки з метою коректного моделювання перехідних процесів при обтіканні гвинта, що дозволяє проаналізувати характер течії в динаміці.

В роботі [11] автори представляють дослідження з впливу різних параметрів на характеристики повітряного гвинта. Аналіз отриманих результатів дозволив авторам зробити висновок щодо ствердження, що вибір кутів атаки суттєво залежить від бажаного діапазону швидкості обертання гвинта. При вивченні аеродинамічних характеристик гвинта досліджувались вплив аеродинамічного профілю, кута атаки та швидкості обертання гвинта. Розрахунок обтікання гвинта проведено за допомогою комерційного розрахункового коду ANSYS Fluent 14.0. Також автори представляють розроблений гвинт, який має покращені тягові характеристики.

Ефект конфігурації ротора вивчається у [12]: дослідження на основі обчислювальної гідродинаміки (CFD) щодо оптимальних аеродинамічних характеристик роторної конфігурації в зависаючих безпілотних літальних апаратах з квадрокоптерами з особливим акцентом на аеродинамічні ефекти розмаху лопаті, подовження та кута нахилу гвинтів. Результати вказують на те, що взаємодії, викликані розмахом лопаті, можуть найбільше змінити виробництво підйомної сили і, отже, призвести до помітного покращення показника ефективності (FM), подовження також відіграє ключову роль у покращенні аеродинамічних характеристик, тоді як ефект кута нахилу менш важливий

Характеристики повітряних гвинтів із зазубринами на передній кромці лопатей досліджені в роботах [13, 14]. Тягові та акустичні характеристики лопатей гвинта із спеціальними зазубринами на передній кромці лопатей досліджується за допомогою методу числового моделювання в роботі [13]. Результати моделювання обтікання показують, що зубці можуть зменшити коливання швидкості та змінити ламінарно-турбулентний перехід, розподіл турбулентності на поверхні всмоктування лопатей гвинта, але параметри зубців впливають на його ефективність. Результати тестування параметрів гвинта із спеціальними зазубринами на передній кромці в заданому діапазоні частоти обертання показують, що досліджений гвинт має покращені показники щодо зниження шуму (в середньому 2,43 дБ і максимально 4,18 дБ) при одночасному збільшенні сили тяги до 3,53%. Результати, представлені в роботі [14] підтверджують твердження, що застосування зазубрин на передній

кромці лопатей з раціонально підібраними параметрами дозволяє підвищити тягові характеристики повітряних гвинтів.

Отже, такі важливі параметри повітряних гвинтів як тяга, яку вони створюють, ККД та рівень акустичної емісії залежить від багатьох параметрів, в тому числі від форми аеродинамічних профілів, форми лопатей, крутки лопаті та ін. Однак залишаються до кінця нерозв'язані задачі щодо визначення характеристик та впливу спеціальних щілин на лопатях з метою підвищення тягових характеристик повітряних гвинтів БПЛА.

Метою дослідження є підвищення сили тяги повітряного гвинта БПЛА шляхом застосування спеціальних щілин на поверхні лопатей.

Для досягнення поставленої мети вирішені наступні **задачі**:

- розробка моделей повітряних гвинтів зі спеціальними щілинами;
- проведення числового моделювання обтікання повітряних гвинтів зі спеціальними щілинами в діапазоні частот обертання від 3990 до 6705 об/хв на режимі роботи на землі;
- аналіз тягових характеристик досліджуваних повітряних гвинтів в заданому діапазоні частоти обертання на режимі роботи на землі.

Постановка задачі дослідження

Для здійснення поставленої задачі в якості об'єкта дослідження обраний десятидюймовий дволопатевий гвинт 1045. Параметри числового експерименту для дослідження характеристик дволопатевого гвинта 1045 представлено в роботі [15].

На рис.1 представлена тривимірна модель досліджуваного базового повітряного гвинта.

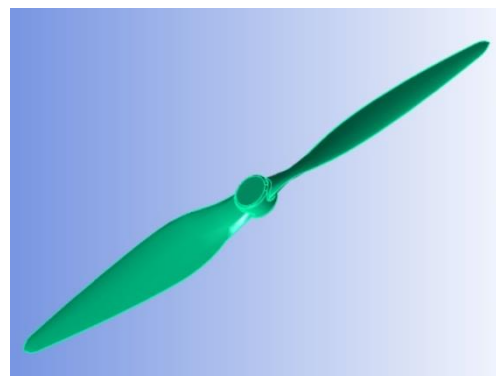


Рис. 1. Тривимірна модель повітряного гвинта 1045

Відповідно до поставленої мети та задач розроблено моделі повітряних гвинтів із спеціальними щілинами – щілинні гвинти, ширина яких становила

2 мм та довжина 30% лопаті. Розроблено 8 моделей гвинтів (рис.2):

- варіант 0 - вихідний варіант;
- варіант 1 - щілина розташована впритул до втулки на відстані 1/3 хорди від переднього краю лопаті;
- варіант 2 - щілина розташована впритул до втулки на відстані 1/2 хорди від переднього краю лопаті;
- варіант 3 - щілина розташована впритул до втулки на відстані 2/3 хорди від переднього краю лопаті;
- варіант 4 - щілина розташована на відстані 1/3 по висоті лопаті від втулки на відстані 1/3 хорди від переднього краю лопаті;
- варіант 5 - щілина розташована на відстані 1/3 по висоті лопаті від втулки на відстані 1/2 хорди від переднього краю лопаті;

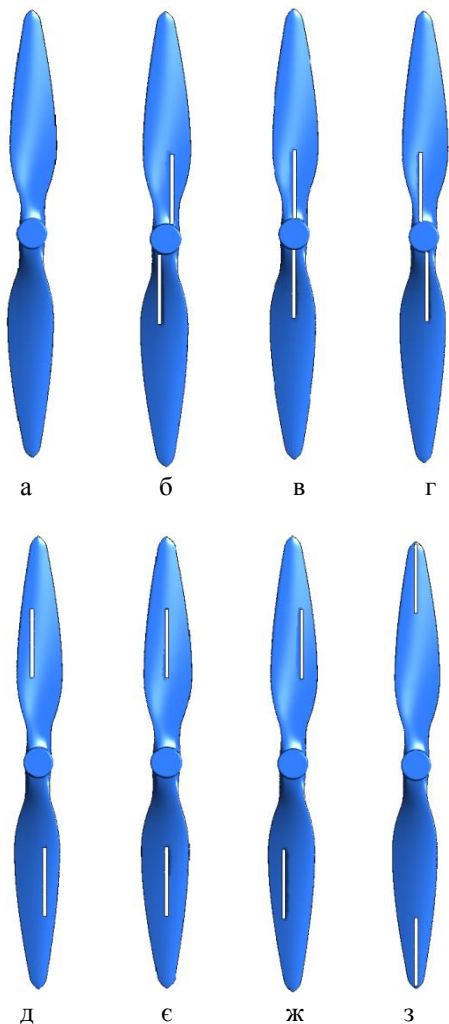


Рис. 2. Моделі досліджуваних повітряних гвинтів: а – варіант №0, б – варіант №1, в – варіант №2, г – варіант №3, д – варіант №4, е – варіант №5, ж – варіант №6, з – варіант №7

– варіант 6 - щілина розташована на відстані 1/3 по висоті лопаті від втулки на відстані 2/3 хорди від переднього краю лопаті;

– варіант 7 - щілина розташована на відстані 2/3 по висоті лопаті від втулки на відстані 1/2 хорди від переднього краю лопаті.

Дослідження характеристик розроблених повітряних гвинтів проводилось методом числового експерименту. При моделюванні обтікання гвинтів рівняння Нав'є – Стокса замикались моделлю турбулентності SST.

Результати

На основі отриманих даних числового моделювання обтікання досліджуваних восьми варіантів повітряних гвинтів з різним місцем розташування щілини отримано залежність у вигляді сили тяги від частоти обертання гвинта, яку представлено на рис. 3.

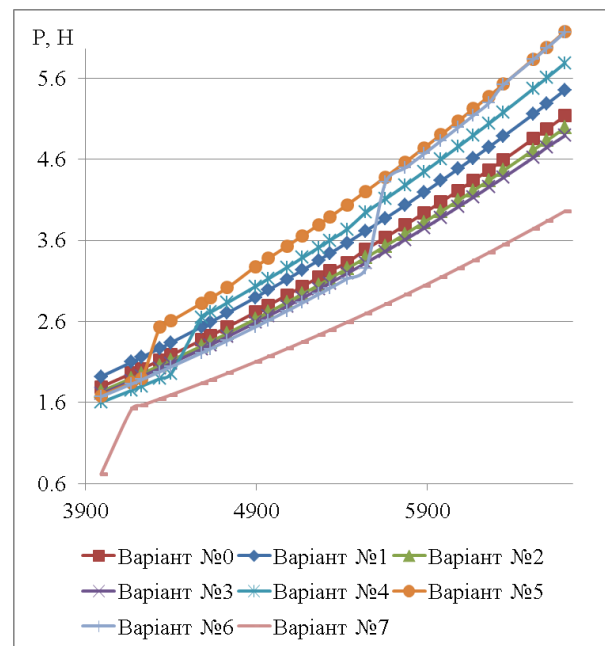


Рис. 3. Результати розрахунків сили тяги від частоти обертання для різних варіантів досліджуваних повітряних гвинтів

Наявність щілини на лопаті гвинта впливає на генерацію сили тяги. Також, можна відзначити, що впливає не тільки наявність щілини, але і її розташування. Так, наприклад, гвинт з щілинами у втулки на відстані 1/3 хорди від переднього краю лопаті (варіант №1) у всьому досліджуваному діапазоні має підвищенні значення тяги на 6,2...7,3 %. Однак інше розташування щілини у втулки (варіант гвинта №2, 3) дає негативний результат і гвинт генерує силу тяги менше, ніж базовий варіант гвинта без щілин.

При наявності щілини на лопатях гвинта в середній частині лопаті при всіх варіантах розташування спостерігається ефект покращення тягової ефективності, але не у всьому діапазоні розглянутих частот обертання гвинта. Варіант гвинта №5 (щілина розташована на відстані 1/3 по висоті лопаті від втулки на відстані 1/2 хорди від переднього краю лопаті) має збільшення сили тяги на 19,2...21,4 % в діапазоні частоти обертання починаючи від 4335 об/хв. Варіант гвинта №4 (щілина розташована на відстані 1/3 по висоті лопаті від втулки на відстані 1/3 хорди від переднього краю лопаті) – має збільшення сили тяги на 11,6...13 %, починаючи зі значень частоти обертання 4580 об/хв. Варіант гвинта №6 (щілина розташована на відстані 1/3 по висоті лопаті від втулки на відстані 2/3 хорди від переднього краю лопаті) – має збільшення сили тяги на 18,4...20,1 %, з частоти обертання 5655 об/хв.

Висновки

Представлені результати проведеного дослідження тягової ефективності повітряних щілинних гвинтів БПЛА, показали, що при раціонально підібраних параметрах щілини, такий повітряний гвинт може генерувати силу тяги до 21% вище, ніж базовий.

Подальшим напрямом дослідження є аналіз номінальної характеристики повітряного гвинта зі щілинами.

Внесок авторів: формулювання проблеми – **М. Г. Марковська, К. В. Балалаєва**; огляд та аналіз інформаційних джерел – **М. Г. Марковська**; розробка моделей для дослідження – **М. Г. Марковська, А. В. Балалаєв**; моделювання обтікання повітряних гвинтів **М. Г. Марковська**; аналіз результатів дослідження – **М. Г. Марковська, К. В. Балалаєва**.

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

Рукопис немає супутніх даних.

Використання штучного інтелекту

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

Усі автори прочитали та погодилися з опублікованою версією рукопису

Література

1. Ucar, U. Optimization of Energy Efficiency According to Freud's Disk Theory Depending on Propeller Pitch Angles [Text] / U. Ucar, Z. U. Bayrak, & B. Tanyeri // In International Symposium on Unmanned Systems and The Defense Industry. – 2021. – P. 121-129. doi: 10.1007/978-3-031-29933-9_14.
2. Azevedo, D. Solving propeller optimization problems by using helical vortex and exact penalty methods [Text] / D. Azevedo, J. L. Reis, & R. L. D. F. Pinto // Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering. – 2023. – Vol. 45(7). – 18 p. doi: 10.1007/s40430-023-04258-y.
3. Torrigiani, F. Variational approach to the problem of the optimal propeller design [Text] / F. Torrigiani, A. Dipace, A. Frediani // Aerotecnica Missili & Spazio. – 2016. – Vol. 95. – P. 13-23. doi: 10.1007/BF03404710.
4. Airfoil Optimization in Propeller Slipstreams Using Generative Adversarial Networks [Text] / Z. Li, M. Yang, Z. Wang [et al.] // In Asia-Pacific International Symposium on Aerospace Technology. – 2023. – P. 1412-1424. doi: 10.1007/978-981-97-4010-9_110.
5. Evolutionary generative design of supercritical airfoils: an automated approach driven by small data [Text] / K. Sun, W. Wang, R. Cheng [et al.] // Complex & Intelligent Systems. – 2024. – Vol. 10(1). – P. 1167-1183. doi: 10.1007/s40747-023-01214-0.
6. Gupta, P. Analysis of generative adversarial networks for data-driven inverse airfoil design [Text] / P. Gupta, P. Tyagi, & R. K. Singh // In Proceedings of International Conference on Information Technology and Applications: ICITA. – 2021. – P. 251-261. doi: 10.1007/978-981-16-7618-5_22.
7. Yonekura, K. Inverse airfoil design method for generating varieties of smooth airfoils using conditional WGAN-gp [Text] / K. Yonekura, N. Miyamoto, & K. Suzuki // Structural and Multidisciplinary Optimization. – 2022. – Vol. 65(6). – 11 p. doi: 10.1007/s00158-022-03253-6.
8. Isogeometric shape optimisation of volumetric blades for aircraft engines [Text] / M. Guerder, A. Duval, T. Elguedj [et al.] // Structural and Multidisciplinary Optimization. – 2022. – Vol. 65(3). – 18 p. doi: 10.1007/s00158-021-03090-z.
9. A simulation-based optimization approach for poultry axial exhaust fans to fulfill aerodynamic and mechanical service constraints [Text] / A. E. Albanesi, J. J. Dorella, B. A. Storti, & N. J. Volpe // Structural and Multidisciplinary Optimization. – 2023. – Vol. 66(2). – 1 P. doi: 10.1007/s00158-023-03506-y.
10. Numerical Investigation of Fluid-Structure Interaction Dynamics in Micro-Rotors [Text] / Q. Li,

L. Wang, W. Yang, & S. Zhang // In *International Conference on Advanced Unmanned Aerial Systems*. – 2024. – P. 183-192. doi: 10.1007/978-981-96-3240-4_20.

11. Choayb, H. Proposition of a propeller shape: A numerical study of its performance [Text] / H. Choayb // *Arabian Journal for Science and Engineering*. – 2024. – Vol. 49(2). – P. 2119-2142. doi:10.1007/s13369-023-08122-y.

12. A biomimetic rotor-configuration design for optimal aerodynamic performance in quadrotor drone [Text] / Y. Li, K. Yonezawa, R. Xu, & H. Liu // *Journal of Bionic Engineering*. – 2021. – Vol. 18(4). – P. 824-839. doi: 10.1007/s42235-021-0069-0.

13. Noise reduction of UAV using biomimetic propellers with varied morphologies leading-edge serration [Text] / Y. Wei, F. Xu, S. Bian, & D. Kong // *Journal of Bionic Engineering*. – 2020. – Vol. 17. – P. 767-779. doi: 10.1007/s42235-020-0054-z.

14. Nikhade, R. T. Computational study on aerodynamic characteristics of propeller with protuberances [Text] / R. T. Nikhade, & G. N. Joshi // *Aerospace Systems*. – 2024. doi: 10.1007/s42401-024-00295-0.

15. Моделювання течії в одноступеневому транзвуковому компресорі Rotor 67 [Text] / Л. Г. Марковська, М. О. Пікуль, В. В. Отрошенко [та ін.] // *Shipbuilding & Marine Infrastructure*. – 2024. – № 2 (19). – С. 14–24.

References

1. Ucar, U., Bayrak, Z. U., & Tanyeri, B. Optimization of Energy Efficiency According to Freud's Disk Theory Depending on Propeller Pitch Angles. In *International Symposium on Unmanned Systems and The Defense Industry*, 2021, pp. 121-129. doi: 10.1007/978-3-031-29933-9_14.

2. Azevedo, D., Reis, J. L., Pinto, R. L. D. F. Solving propeller optimization problems by using helical vortex and exact penalty methods. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, 2023, vol. 45 (7). 18 p. doi: 10.1007/s40430-023-04258-y.

3. Torrigiani, F., Dipace, A., & Frediani, A. Variational approach to the problem of the optimal propeller design. *Aerotecnica Missili & Spazio*, 2016, vol. 95, pp.13-23. doi: 10.1007/BF03404710.

4. Li, Z., Yang, M., Wang, Z., Wei, W., & Zhou, Z. Airfoil Optimization in Propeller Slipstreams Using Generative Adversarial Networks. In *Asia-Pacific International Symposium on Aerospace Technology*, 2023, pp. 1412-1424. doi: 10.1007/978-981-97-4010-9_110.

5. Sun, K., Wang, W., Cheng, R., Liang, Y., Xie, H., Wang, J., & Zhang, M. Evolutionary generative

design of supercritical airfoils: an automated approach driven by small data. *Complex & Intelligent Systems*, 2024, vol. 10(1), pp. 1167-1183. doi: 10.1007/s40747-023-01214-0.

6. Gupta, P., Tyagi, P., & Singh, R. K. Analysis of generative adversarial networks for data-driven inverse airfoil design. In *Proceedings of International Conference on Information Technology and Applications: ICITA*, 2021, pp. 251-261. doi: 10.1007/978-981-16-7618-5_22.

7. Yonekura, K., Miyamoto, N., Suzuki, K. Inverse airfoil design method for generating varieties of smooth airfoils using conditional WGAN-gp. *Structural and Multidisciplinary Optimization*, 2022, vol. 65(6). 11 p. doi: 10.1007/s00158-022-03253-6.

8. Guerder, M., Duval, A., Elguedj, T., Feliot, P., & Touzeau, J. Isogeometric shape optimisation of volumetric blades for aircraft engines. *Structural and Multidisciplinary Optimization*, 2022, vol. 65(3). 18 p. doi: 10.1007/s00158-021-03090-z.

9. Albanesi, A. E., Dorella, J. J., Storti, B. A., & Volpe, N. J. A simulation-based optimization approach for poultry axial exhaust fans to fulfill aerodynamic and mechanical service constraints. *Structural and Multidisciplinary Optimization*, 2023, vol. 66(2). 1 p. DOI: 10.1007/s00158-023-03506-y.

10. Li, Q., Wang, L., Yang, W., & Zhang, S. Numerical Investigation of Fluid-Structure Interaction Dynamics in Micro-Rotors. In *International Conference on Advanced Unmanned Aerial Systems*, 2024, pp. 183-192. doi: 10.1007/978-981-96-3240-4_20.

11. Choayb, H. Proposition of a propeller shape: A numerical study of its performance. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 2024, vol. 49(2), pp. 2119-2142. doi:10.1007/s13369-023-08122-y.

12. Li, Y., Yonezawa, K., Xu, R., & Liu, H. A biomimetic rotor-configuration design for optimal aerodynamic performance in quadrotor drone. *Journal of Bionic Engineering*, 2021, vol. 18(4), pp. 824-839. doi: 10.1007/s42235-021-0069-0.

13. Wei, Y., Xu, F., Bian, S., & Kong, D. Noise reduction of UAV using biomimetic propellers with varied morphologies leading-edge serration. *Journal of Bionic Engineering*, 2020, vol. 17, pp. 767-779. doi: 10.1007/s42235-020-0054-z.

14. Nikhade, R. T., & Joshi, G. N. Computational study on aerodynamic characteristics of propeller with protuberances. *Aerospace Systems*, 2024. doi: 10.1007/s42401-024-00295-0.

15. Markovska, L. H., Pikul, M. O., Otroshchenko, V. V., Melchenko, A. O., & Balalaieva, K. V. Моделювання течії в одноступеневому транзвуковому компресорі Rotor 67. [Modeling of flow in a single-stage transonic compressor Rotor 67]. *Shipbuilding & Marine Infrastructure*, 2024, vol. 2 (19), pp. 14–24. (in Ukrainian).

Надійшла до редакції 13.06.2025, розглянута на редколегії 18.08.2025

ASSESSMENT OF THE THRUST FORCE OF UAV SLOTTED PROPELLERS

Liubov Markovska, Kateryna Balalaieva, Anton Balalaiev

The thrust characteristics of slotted propellers of an unmanned aerial vehicle **are the subject of the study**. The **study object** is a slotted propeller of an unmanned aerial vehicle. This study aims to increase the thrust of the propeller of an unmanned aerial vehicle by using special slots on the blade surface. The following **tasks** were solved to achieve the stated goals: development of propeller models with special slots; numerical simulation of the flow past propellers with special slots in the rotation frequency range from 3990 to 6705 rpm in the ground operating mode; analysis of the thrust characteristics of the studied propellers in a given rotation frequency range in the ground operating mode. The study was conducted for propellers with special slots, the width of which was 2 mm and the blade length was 30%. 8 models of slotted propellers were developed. A numerical experiment was used to calculate the thrust of the studied propellers. **Results:** The thrust generation is affected by the presence of a slot on the propeller blade. Notably, not only the presence of a gap but also its location has an effect. In the presence of a gap on the propeller blades in the middle part of the blade, an effect of improving the thrust efficiency is observed for all location options, but not in the entire range of considered propeller rotation frequencies. The results of the conducted study of the thrust efficiency of air slot propellers of unmanned aerial vehicles showed that such a propeller can generate a thrust force up to 21% higher than the basic propeller without gaps with rationally selected gap parameters. A further direction of this study is the analysis of the normal characteristics of a propeller with slots. **Scientific novelty and practical significance of the work:** the thrust characteristics of air slot propellers for unmanned aerial vehicles were studied for the first time. The obtained results can be used to develop promising propellers with increased thrust efficiency.

Keywords: propeller blade; gap; slotted propeller; thrust; numerical modeling; unmanned aerial vehicle; propeller; efficiency.

Марковська Любов Георгіївна – асп. каф. авіаційних двигунів, Державне некомерційне підприємство «Державний університет «Київський авіаційний інститут», Київ, Україна.

Балаласва Катерина Вікторівна – д-р техн. наук, доц., проф. каф. авіаційних двигунів, Державне некомерційне підприємство «Державний університет «Київський авіаційний інститут», Київ, Україна.

Балаласв Антон Валерійович – канд. техн. наук, доц., доц. каф. прикладної механіки та інженерії матеріалів, Державне некомерційне підприємство «Державний університет «Київський авіаційний інститут», Київ, Україна.

Liubov Markovska – PhD Student of the Department of Aviation Engine, State Non-Profit Enterprise “State University “Kyiv Aviation Institute”, Kyiv, Ukraine,
e-mail: plohiv_love@ukr.net, ORCID: 0009-0004-7340-2382.

Kateryna Balalaieva - Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Professor at the Department of Aviation Engine, State Non-Profit Enterprise “State University “Kyiv Aviation Institute”, Kyiv, Ukraine,
e-mail: kiki_ua@ukr.net, ORCID: 0000-0001-6495-3263.

Anton Balalaiev – PhD, Associate Professor, Associate Professor at the Department of Applied Mechanics and Materials Engineering, State Non-Profit Enterprise “State University “Kyiv Aviation Institute”, Kyiv, Ukraine,
e-mail: avbalalaiev@ukr.net, ORCID: 0000-0003-3603-4512.