

ЗАТВЕРДЖУЮ



в.о. президента державного некомерційного підприємства "Державний університет "Київський авіаційний інститут"

Ксенія СЕМЕНОВА

02 2025 року

ВИСНОВОК

Державного некомерційного підприємства "Державний університет "Київський авіаційний інститут" (далі – КАІ) про наукову новизну, теоретичне та практичне значення результатів дисертації Ковтуна Артема Анатолійовича, поданої на здобуття ступеня доктора філософії за спеціальністю 142 "Енергетичне машинобудування" на тему "Оптимізація параметрів повітряного гвинта силової установки безпілотного літального апарату"

Витяг

із протоколу № 1 розширеного засідання
кафедри авіаційних комп'ютерно-інтегрованих комплексів КАІ
від 31 січня 2025 року

Присутні на засіданні науково-педагогічні працівники кафедри авіаційних комп'ютерно-інтегрованих комплексів:

Головуючий на засіданні – зав. кафедри, д.т.н., професор Терещенко Ю.М.
Андрієць О.Г., к.т.н., доцент, доцент кафедри;
Балаласва К.В., д.т.н., доцент, професор кафедри;
Капітанчук К.І., к.т.н., доцент, доцент кафедри;
Якушенко О.С., к.т.н., с.н.с, доцент кафедри;
Волянська Л.Г., к.т.н., доцент, доцент кафедри;
Терещенко Ю.Ю., д.т.н., доцент, доцент кафедри;
Гвоздецький І.І., к.т.н., доцент, доцент кафедри;
Ратинський В.В., к.т.н., доцент кафедри
Чумак О.І., старший викладач кафедри;
Нікітіна Г.М., старший викладач кафедри;

Присутні на засіданні науково-педагогічні працівники інших кафедр КАІ:

Мікосянчик О.О., д.т.н., професор, завідувач кафедри прикладної механіки та

інженерії матеріалів;

Попов О.В., к.т.н., доц., завідувач кафедри підтримання льотної придатності повітряних суден;

Єнчев С.В., д.т.н., проф., завідувач кафедри автоматизації та енергоменеджменту.

Присутні на засіданні науково-педагогічні працівники з інших навчальних закладів та наукових установ:

Мітрахович М.М., д.т.н., професор, заступник директора ДП «Івченко-Прогрес».

Присутні на засіданні аспіранти кафедри авіаційних двигунів:

Мельченко А.В., аспірант другого року навчання, спеціальність 142 «Енергетичне машинобудування».

Серед присутніх 6 доктори технічних наук і 7 кандидатів технічних наук – фахівці зі спеціальності, з якої виконувалась дисертація.

Порядок денний:

Обговорення дисертаційного дослідження аспіранта кафедри авіаційних двигунів КАІ Ковтуна Артема Анатолійовича на тему “Оптимізація параметрів повітряного гвинта силової установки безпілотного літального апарату”, поданої на здобуття ступеня доктора філософії з галузі знань 14 “Електрична інженерія” за спеціальністю 142 “Енергетичне машинобудування”.

Науковий керівник – д.т.н., доц., професор кафедри авіаційних двигунів Аерокосмічного факультету КАІ Балалаєва Катерина Вікторівна.

Дисертація виконувалась на кафедрі авіаційних двигунів Аерокосмічного факультету КАІ. Тема дисертації затверджена на засіданні Вченої ради Аерокосмічного факультету КАІ, (протокол № 3 від 22 листопада 2022 року). Уточнену редакцію теми дисертаційного дослідження затверджено на засіданні Вченої ради КАІ (протокол № 1 від 19 грудня 2024 року).

Виступили:

Здобувач Ковтуна Артема Анатолійович представив презентацію за основними положеннями дисертації “Оптимізація параметрів повітряного гвинта силової установки безпілотного літального апарату”, поданої на здобуття ступеня доктора філософії з галузі знань 14 “Електрична інженерія” за спеціальністю 142 “Енергетичне машинобудування”.

Доброго дня, шановні учасники міжкафедрального семінару! До вашої уваги представляється доповідь за результатами дисертаційного дослідження на тему «Оптимізація параметрів повітряного гвинта силової установки безпілотного літального апарату».

Сучасні безпілотні літальні апарати (БПЛА) відіграють ключову роль у різних галузях, включаючи сільське господарство, моніторинг навколишнього середовища, доставку вантажів, пошуково-рятувальні операції та військове застосування. Зі збільшенням попиту на БПЛА, вимоги до їх ефективності та

екологічності зростають. Важливим питанням є зниження шуму безпілотних літальних апаратів, який негативно впливає на місцевих жителів, тварин на фермі. При проведенні військових або пошуково-рятувальних операцій акустичні характеристики безпілотних літальних апаратів - один з факторів, що визначає успіх місії.

Характеристики БПЛА залежать від багатьох чинників, одним із яких виступає повітряний гвинт. Повітряний гвинт є одним із основних джерел шуму БПЛА.

ККД гвинтів та шум малорозмірних БПЛА будуть залежати від багатьох факторів повітряного гвинта:

- геометричної форми лопаті,
- кількості лопатей,
- режиму роботи гвинта,
- кількості гвинтів,
- наявності капоту,
- матеріалу гвинтів
- інтеграції гвинтів з БПЛА

Малорозмірні БПЛА багаторазового використання мають змінну масу під час польоту (наприклад, до пункту призначення БПЛА має посылку, після її доставки його маса зменшується на вагу посылки). При виконанні місії БПЛА повинен мати високий ККД при змінній масі, що призводить до потреби забезпечення високого ККД в певному діапазоні сили тяги.

Вирішення завдання щодо зменшення рівня шуму гвинта можна за допомогою оптимізації параметрів гвинта БПЛА. Зниження рівня шуму БПЛА важливо для застосування БПЛА в урбанізованих районах, а також для військових та розвідувальних завдань, де потрібна скритність.

Треба відзначити, що багато дослідників займаються питаннями покращення характеристик повітряних гвинтів малорозмірних БПЛА, а саме Marino L., Leslie A., Malgoezar A. M., Gur O., Rosen A., Guo J., Figliozzi M. A., Yadav S., Алексеєнко С., Сокол Г., Михальов Д., Соловйов О. та багато ін.

Отже, оптимізація параметрів повітряних гвинтів БПЛА дозволить підвищити коефіцієнт корисної дії (ККД), знизити акустичне випромінювання. Це особливо актуально для малорозмірних БПЛА, які часто обмежені запасом енергії та вагою корисного навантаження. Підвищення ефективності гвинтів малорозмірних БПЛА сприяє розвитку екологічно чистих та економічно вигідних рішень у галузі безпілотних технологій.

Дисертаційну роботу присвячено вирішенню науково-прикладного завдання підвищення ефективності гвинтів малорозмірних безпілотних літальних апаратів, що залишається до кінця не розв'язаним.

Тема роботи є актуальною і має важливе наукове та практичне значення.

Мета роботи: підвищення ККД та зниження рівня звукового тиску у ближньому полі гвинта БПЛА шляхом оптимізації параметрів повітряного гвинта двигуна безпілотного літального апарату.

Для досягнення поставленої мети були поставлені та вирішені наступні завдання:

1. Аналіз методів дослідження течії у гвинтах малорозмірних БПЛА, вибір моделі турбулентної в'язкості.
2. Розробка алгоритму розрахунку параметрів гвинта двигуна БПЛА за допомогою оптимізації його параметрів.
3. Дослідження впливу форми та кількості лопатей на ККД гвинта.
4. Дослідження впливу форми та кількості лопатей на рівень звукового тиску гвинта у ближньому полі.

Об'єкт - повітряний гвинт силової установки малорозмірного безпілотного літального апарату.

Предмет - ККД та рівень звукового тиску повітряного гвинта силової установки малорозмірного безпілотного літального апарату.

На слайді представлено методи дослідження, публікації та чим забезпечувалась достовірність отриманих результатів роботи.

На даному слайді представлено апробацію матеріалів дисертації та структуру і обсяг дисертації.

Відповідно до поставлених завдань в роботі виконано тестову задачу моделювання течії у повітряному гвинті з метою вибору моделі турбулентної в'язкості для подальших досліджень.

Об'єктом виступав повітряний гвинт малорозмірного БПЛА. На слайді представлено зовнішній вигляд досліджуваного гвинта, твердотільна тривимірна модель досліджуваного гвинта. В ході роботи тестувались 5 моделей турбулентності. На графіку представлено порівняння отриманих результатів методом чисельного експерименту та даних фізичного експерименту. Похибка з дослідженими моделями турбулентності становить близько 5%.

Аналіз проведеного моделювання показав, що похибка з дослідженими моделями турбулентності становить близько 5%. Найменша похибка має місце при моделюванні течії у гвинті з використанням моделі турбулентності $k-\epsilon$ та $k-\epsilon$ EARSM, однак найменший час та прийнятна точність має місце при розрахунку з моделлю SST.

Тому для наступних досліджень обрано саме модель турбулентності SST.

Відповідно до поставлених задач наступним кроком в роботі була розробка алгоритму розрахунку параметрів гвинта силової установки БПЛА за допомогою оптимізації його параметрів.

Методи оптимізації - це набір технік та алгоритмів, які використовуються для знаходження найкращого рішення у заданих умовах та обмеженнях. Основна мета методів оптимізації полягає в мінімізації або максимізації цільової функції (або безлічі цільових функцій). Оптимізація авіаційних гвинтів для БПЛА є складним та багатограним процесом, що вимагає врахування безлічі факторів та використання сучасних методів та технологій. В основі будь-якої оптимізації лежить необхідність досягнення компромісу між протилежними вимогами. Одним із ключових аспектів оптимізації гвинтів є аеродинаміка. При створенні гвинтів БПЛА з цільовою функцією максимізації ККД або мінімізації гідравлічних втрат можуть бути оптимізовані профілі лопаті, кути установки, форма лопаті, кінцевий і втулковий діаметр, кількість лопатей і т.д.

Для даного дослідження розроблено алгоритм оптимізації параметрів гвинта

БПЛА з метою максимізації ККД та мінімізації рівня звукового тиску SPL у ближньому полі. На рисунку зображено блок-схему оптимізації, яка має один критерій та декілька обмежень.

Оптимізація параметрів гвинта двигуна БПЛА складається з декілька кроків. Цільовою функцією оптимізації є максимізація ККД.

Першим кроком є оптимізація форми лопаті гвинта двигуна БПЛА. Задля можливості визначити вплив форми лопаті гвинта на ККД та SPL, всі інші параметри фіксуються та залишаються незмінними при дослідженні різних форм лопатей. Результатом першого кроку оптимізації є знаходження форми із ряду досліджених, яка забезпечує при всіх інших рівних умовах максимальні значення ККД та мінімальне значення SPL або не вище заданого значення при заданих режимах роботи гвинта силової установки БПЛА.

Другим кроком є оптимізація кількості лопатей оптимальної форми. З метою проведення оцінки впливу кількості лопатей гвинта БПЛА на ККД та SPL, всі інші параметри гвинта БПЛА фіксуються та залишаються незмінними при дослідженні гвинтів з різною кількістю лопатей. Результатом другого кроку оптимізації є знаходження оптимальної кількості лопатей гвинта, яка забезпечує, при всіх інших рівних умовах, максимальні значення ККД та мінімальне значення SPL або не вище заданого значення при заданих режимах роботи гвинта БПЛА.

В результаті проведення двох кроків оптимізації отримуємо гвинт з оптимізованими параметрами, який має найвищі значення ККД в заданому діапазоні режимів роботи та мінімальний рівень звукового тиску у ближньому полі.

На слайді подано формулювання задачі оптимізації повітряного гвинта з додатковими обмеженнями.

Цільові функції:

– ККД гвинта η .

Задача оптимізації повітряного гвинта є знаходження геометричних параметрів гвинта БПЛА, які б відповідали максимальним значенням ККД при обмеженні $SPL \leq 84$ дБ в заданому діапазоні сили тяги.

Математична постановка представлена на слайді.

В ході першого кроку оптимізації параметрів гвинта оптимізовано форму лопатей гвинта БПЛА. На слайді показані досліджені варіанти гвинтів.

За результатами дослідження отримана характеристика гвинтів БПЛА у вигляді залежності ККД та рівня звукового тиску SPL від тяги гвинта. При аналізі отриманих даних можна підтвердити твердження, що форма лопатей впливає на ККД та акустичне випромінювання. Із досліджених гвинтів з різними формами лопатей, варіант гвинта №1 має максимальні значення ККД в заданому діапазоні сили тяги, однак при цьому SPL має найвищі значення, але відповідає заданій умові $SPL < 84$ дБ.

Тому для наступного кроку оптимізації обирається варіант гвинта №1.

На наступному слайді представлено розподілення аеродинамічного навантаження лопаті гвинта БПЛА. Візуалізація розподілення аеродинамічного навантаження, яке створюють досліджені сім варіантів гвинтів показує, що форма лопаті впливає на створення сили тяги. Характерно, що у всіх досліджуваних

гвинтів по всій висоті лопатки передня частина лопаті не працює, тобто практично не створює силу тяги.

Варіант гвинта №1 має характерну особливість форми лопатей, які створюють силу тяги по всій довжині лопаті, включаючи і втулкову частину і периферійну.

Другим кроком оптимізації є оцінка впливу кількості лопатей на ККД та SPL гвинта.

Кількість лопатей змінювалась від 2 до 5.

За базовий варіант гвинта приймаємо варіант гвинта №1.

На слайді представлено твердотільні моделі досліджуваних гвинтів.

За результатами досліджень побудована номограма характеристик гвинтів квадрокоптера у вигляді залежності ККД гвинтів квадрокоптера та рівня звукового тиску SPL від тяги гвинта, яка представлена на слайді.

ККД залежить від кількості лопатей гвинта. ККД з двома лопатями в досліджуваному діапазоні сили тяги має найменші значення ККД. Найбільші значення має гвинт з трьома лопатями.

Щодо SPL, то трилопатевий гвинт має кращі акустичні характеристики, ніж дволопатевий, $SPL < 82,5$ дБ.

На наступному слайді представлено розподілення аеродинамічного навантаження лопаті гвинта БПЛА. Оцінка значень сили тяги, яку створюють досліджувані гвинти з різною кількістю лопатей показує, що сумарна сила тяги гвинта з кількістю лопатей зростає, але при цьому сила тяги, яку створює кожна лопать зменшується. Також, можна відзначити, що характер розподілення аеродинамічного навантаження залишається незмінним вздовж лопатей, і не залежить від кількості лопатей, а залежить тільки від форми лопаті. Оцінка значень сили тяги, яку створюють досліджувані гвинти з різною кількістю лопатей показує, що сумарна сила тяги гвинта з кількістю лопатей зростає, але при цьому сила тяги, яку створює кожна лопать зменшується.

Також, можна відзначити, що характер розподілення поля аеродинамічного навантаження залишається незмінним вздовж лопатей, і не залежить від кількості лопатей, а залежить тільки від форми лопаті.

Отже, у роботі вирішено науково-прикладну задачу щодо оптимізації параметрів повітряного гвинта двигуна БПЛА.

За допомогою оптимізації параметрів гвинта БПЛА отримано повітряний гвинт з оптимальною формою та кількістю лопатей - трилопатевий гвинт з варіантом лопаті №1, який забезпечує значення ККД до 0,97 у заданому діапазоні сили тяги $R=1,7...3,0H$ і SPL до 82,5 дБ.

Результат оптимізації параметрів гвинта БПЛА представлено на слайді.

Наукова новизна отриманих результатів.

➤ Удосконалено гвинт БПЛА, який забезпечує високий ККД та низький рівень шуму в заданому діапазоні сили тяги.

➤ Отримала подальший розвиток теорія гвинтів БПЛА у питаннях оптимізації параметрів гвинтів – розроблено алгоритм розрахунку параметрів гвинта БПЛА з урахуванням форми та кількості лопатей гвинта.

➤ Отримали подальший розвиток дослідження аероакустичних характеристик повітряних гвинтів БПЛА типу квадрокоптер.

➤ Вперше проведено оцінку ККД та рівня звукового тиску у ближньому полі гвинта малорозмірного БПЛА типу квадрокоптер з широкохордними лопатями методом числового експерименту.

Практичне значення отриманих результатів:

Застосування у практиці створення повітряних гвинтів двигунів БПЛА отриманих рекомендацій щодо вибору форми та кількості лопатей гвинта двигуна БПЛА з метою покращення аероакустичних характеристик та удосконаленого алгоритму оптимізації параметрів гвинта двигуна БПЛА дозволять підвищити ефективність застосування БПЛА.

Практичне значення отриманих результатів підтверджується довідками про впровадження результатів, що одержані у дисертаційній роботі, на ДП «Івченко-Прогрес» та АТ «Антонов».

На наступних слайдах представлено висновки за роботою. Доповідь завершено.

Після закінчення презентації Ковтуну А. А. присутніми на захисті фахівцями були поставлені наступні запитання:

Запитання до здобувача:

1. **Попов О.В.**, к.т.н., доц., завідувач кафедри підтримання льотної придатності повітряних суден КАІ.

Запитання: Об'єкт – це явище або процес, прокоментуйте об'єкт в своїй роботі?

Відповідь: Дякую за запитання. Так, дійсно, об'єкт – це явище або процес. В даному випадку об'єкт – повітряний гвинт силової установки малорозмірного безпілотної літального апарату - це явище матеріального світу.

2. **Мітрахович М.М.**, д.т.н., професор, заступник директора ДП «Івченко-Прогрес»..

Запитання: Вами сформульовано обмеження по SPL 84 дБ, на підставі чого ви визначити такий рівень звукового тиску як обмеження?

Відповідь: Дякую за запитання. SPL=84дБ звучить як шум насиченої автостради, шум мотоцикла. 84дБ максимально допустимий звуковий тиск для навушників плеєра. Обрали значення SPL<84дБ, оскільки акустичне випромінювання гвинта або гвинтів для малорозмірних БПЛА є проблемою як для навколишнього середовища, так і для користувачів, якщо ці БПЛА мають військове призначення.

Запитання: Які вам відомі основні фактори, що впливають на ККД повітряного гвинта БПЛА і які з цих факторів ви обрали для дослідження?

Відповідь: Дякую за запитання. ККД гвинтів та шум малорозмірних БПЛА будуть залежати від багатьох факторів повітряного гвинта: геометричної форми лопаті, кількості лопатей, режиму роботи гвинта, кількості гвинтів, наявності капоту, матеріалу гвинтів, інтеграції гвинтів з БПЛА.

Запитання: За допомогою чого змінюється режим роботи гвинта?

Відповідь: Дякую за запитання. За рахунок зміни частоти обертання.

Запитання: Як ви вважаєте, можливо за фактор, який впливає на ККД краще записати не інтеграція гвинтів і БПЛА, а інтерференція гвинтів і БПЛА?

Відповідь: Дякую за цікаве запитання. На мій погляд, треба додати до переліку факторів інтерференція гвинтів і БПЛА і залишити інтеграцію гвинтів і БПЛА.

3. Ратинський В.В., к.т.н., доцент кафедри авіаційних двигунів КАІ.

Запитання: Відкрийте, будь ласка, слайд з тестовою задачею. Як ви проводили фізичний експеримент?

Відповідь: Дякую за запитання. Це відомі результати фізичного експерименту, експеримент проводився в КП. Експериментальний стенд для випробувань повітряних гвинтів складався з наступних елементів: електродвигун, пружне з'єднання, тахогенератор, досліджуваний гвинт, кріплення двигуна та тахогенератора, платформа для кріплення двигуна до паралелограмного тензорезисторного датчика сили, паралелограмний тензорезисторний датчик сили, перетворювач вихідного сигналу, комп'ютер та монітор. Для проведення тестової задачі було відтворено геометричну модель досліджуваного гвинта, яка повністю ідентична з досліджуваним гвинтом під час фізичного експерименту. Метою тестової задачі було вибір та обґрунтування моделі турбулентної в'язкості.

Запитання: Як ви визначали коефіцієнт корисної дії?

Відповідь: Дякую за запитання. ККД розраховували за формулою $\eta = PV / M_{кр} \omega$, де V швидкість польоту, ω — кутова швидкість обертання, P — тяга гвинта, $M_{кр} \omega$ — потужність двигуна, $M_{кр}$ — крутний момент на валу. Ці параметри розраховувались інструментами модуля CFX при опрацюванні результатів моделювання обтікання повітряного гвинта.

Запитання: Ви визначаєте кількість лопатей повітряного гвинта. Відомо, що при збільшенні кількості лопатей гвинта зростає тяга, яку створює гвинт і відповідно потужність, яка необхідна для обертання цього гвинта. Ви враховували це?

Відповідь: Дякую за запитання. Так, ви праві, при збільшенні кількості лопатей при незмінній формі лопаті та кутах установки лопатей зростає і сила тяги і потужність. При оцінці результатів це розраховувалось і було враховано під час розрахунку ККД. Для БПЛА, який має акумулятор, що має певний запас енергії для приводу двигуна — це буде означати, що з гвинтами, які мають більше лопатей БПЛА зможе летіти менший проміжок часу, але при цьому сила тяги буде значно більша. Однак, якщо зменшити частоту обертання при генерації необхідної сили тяги, то потужність звичайно теж буде менше. Але така детальна оцінка в роботі не проводилась, це не було предметом дослідження. Також, треба врахувати той факт, що при зниженні частоти обертання шум, який генерує гвинт, зменшиться, це також є вагомим фактором.

4. Гвоздецький І.І., к.т.н., доцент, доцент кафедри авіаційних двигунів КАІ.

Запитання: Розшифруйте, будь ласка, SPL?

Відповідь: Дякую за запитання. SPL — Sound Pressure Level — рівень звукового тиску.

5. Єнчев С.В., д.т.н., професор, завідувач кафедри автоматизації та енергоменеджменту КАІ.

Запитання: Чому на графіку залежності ККД та SPL від тяги значення по шкалі SPL мають від'ємні значення?

Відповідь: Дякую за запитання. Це технічна опечатка, дякую, виправлю.

Запитання: Відомо, що встановленні шаблевидних гвинтів приводить до покращення акустичних характеристик на літаках з турбогвинтовими двигунами. У вашому випадку застосування шаблевидних повітряних гвинтів не дало такого результату. Чому, як ви вважаєте?

Відповідь: Дякую за запитання. Під час проведення досліджень також була гіпотеза, що гвинт з саме цією формою лопатей буде мати найкращі акустичні характеристики, але гіпотеза не підтвердилася. Можливо, це пов'язано з тим, що є велика різниця в геометричних розмірах гвинтів, які встановлюються на літаках і повітряних гвинтах, що встановлюються на малорозмірних БПЛА. Також, можливо для цієї форми треба було оптимізувати кути установки лопаті.

6. Якушенко О.С., к.т.н., с.н.с., доцент кафедри авіаційних двигунів КАІ.

Запитання: Ви спочатку вибрали і прорахували варіанти повітряного гвинта з різною формою лопаті, вибрали найкращу форму лопаті, потім прорахували варіанти з різною кількістю лопатей і обрали найкращій?

Відповідь: Дякую за запитання. Так, відповідно до алгоритму розрахунку повітряного гвинта, який запропоновано в роботі першим кроком оптимізації є вибір форми лопаті гвинта, другим кроком – вибір кількості лопатей. Цільовою функцією оптимізації є максимізація ККД, обмеженнями є діапазон сили тяги, яку створює повітряний гвинт - від 1,7Н до 3 Н, також обмеженням є те, що повітряний гвинт повинен генерувати $SPL \leq 84$ дБ.

Запитання: Коли ви обрали форму лопаті скільки лопатей мав повітряний гвинт?

Відповідь: Дякую за запитання. Повітряний гвинт мав дві лопаті.

Запитання: Коли ви обрали кількість лопатей, чому ви вирішили, що гвинти з іншими формами лопатями з трьома лопатями будуть мати гірші характеристики, ніж обраний варіант? Цикл оптимізації незавершено, треба було ще зробити розрахунки для трилопатевого гвинта з різними формами лопатей для підтвердження отриманого результату.

Відповідь: Дякую за запитання. При аналізі результатів, які було отримано під час першого кроку оптимізації параметрів повітряного гвинта БПЛА, виявлено, що повітряний гвинт з першою формою лопаті має суттєвий відрив за значеннями ККД (понад 2%) і це дозволило зробити висновок, що робити ще один цикл розрахунків з трьома лопатями не є раціональним. Справа в тому, що не дивлячись на те, що дослідження параметрів повітряного гвинта методом числового експерименту дозволяє за короткі терміни проводити дослідження, але вирішення задачі моделювання обтікання для повітряного трилопатевого гвинта з семи різними формами лопатей для заданого діапазону частот обертання – це 63 розрахунки, що є досить суттєвим за часом.

Запитання: Відкрийте, будь ласка, 17 слайд. Коли я навчався в університеті, під час вивчення вертольоту Мі-8 викладач розповідав нам, що чим менша площа лопатей відносно площі, яка омітається, тим краще. У вас же спостерігається зовсім інша залежність. Як ви можете це пояснити?

Відповідь: Дякую за запитання. Перше, що можу сказати, напевно цей ефект не зберігається для малих гвинтів малорозмірних БПЛА. Також, можливо, що на ККД впливають трикутники швидкостей, які для різних частот обертання будуть різні. А у зв'язку з тим, що при дослідженні порівнювались варіанти повітряних гвинтів з різною частотою, які генерували однакову силу тяги, то відповідно режими роботи у них були різні.

Після відповідей на запитання виступили:

Науковий керівник – д.т.н., доц., професор кафедри авіаційних двигунів Аерокосмічного факультету КАІ Балалаєва Катерина Вікторівна

Балалаєва К.В.: Ковтун Артем Анатолійович успішно виконав індивідуальний план наукової роботи та індивідуальний навчальний план. Підготовлена дисертація готова до захисту. У роботі опрацьовано досить багато різноманітного матеріалу, дуже багато наукових праць – англомовні видання, які дозволили узагальнити досить широкий світовий досвід. Тема роботи є актуальною.

У процесі виконання роботи дисертант показав необхідну кваліфікацію для самостійного вирішення поставлених наукових задач. Ковтун Артем Анатолійович постійно працює над підвищенням свого освітнього і професійного рівня. Вміє проводити наукові дослідження, приймає участь у науково-дослідних роботах, має наукові публікації та доповіді у наукових конференціях.

Дисертаційна робота є завершеною науковою працею, яка націлена на вирішення актуальної наукової задачі, відповідає спеціальності 142 “Енергетичне машинобудування”, а її автор Ковтун Артем Анатолійович заслуговує присудження ступеня доктора філософії, на підставі Порядку присудження ступеня доктора філософії та скасування рішення разової спеціалізованої вченої ради закладу вищої освіти, наукової установи про присудження ступеня доктора філософії, який затверджено Постановою Кабінету Міністрів України № 44 від 12 січня 2022 року.

Науковий керівник запропонував затвердити позитивний висновок про наукову новизну, теоретичне та практичне значення результатів зазначеної дисертації та рекомендувати до захисту на здобуття ступеня доктора філософії з галузі знань 14 “Електрична інженерія”, за спеціальністю 142 “Енергетичне машинобудування”.

Рецензенти дисертаційної роботи, які наголосили на позитивних аспектах дослідження та висловили свої побажання та зауваження:

Якушенко О.С., к.т.н, с.н.с, доцент кафедри авіаційних двигунів КАІ.

Рецензент зазначив, що робота виконана на високому науковому рівні, тема роботи є актуальною та має важливе наукове та практичне значення. У роботі вирішено науково-прикладну задачу щодо оптимізації параметрів повітряного гвинта силової установки БПЛА типу квадрокоптер.. Представлена робота відповідає вимогам для галузі знань 14, у тому числі за рахунок практичного використання для створення перспективних повітряних гвинтів силових установок БПЛА.

Основні результати дисертаційної роботи представлено у 5 наукових статтях, опублікованих у журналах, що входять до переліку фахових видань за

спеціальністю 142 «Енергетичне машинобудування» (категорія Б), в тому числі 2 статті одноосібні, та 7 тезах доповідей на науково-технічних конференціях.

Загалом дисертаційна робота є завершеною та такою, що відповідає вимогам чинного Порядку присудження ступеня доктора філософії та скасування рішення разової спеціалізованої вченої ради закладу вищої освіти, наукової установи про присудження ступеня доктора філософії.

Волянська Л.Г., к.т.н., доцент, доцент кафедри авіаційних двигунів КАІ.

Рецензент зазначив, що представлена дисертаційна робота «Оптимізація параметрів повітряного гвинта силової установки безпілотного літального апарату» виконана за актуальною темою, містить наукову новизну та практичне значення. Робота є логічною та цілісною, мета та поставлені задачі корелюються з висновками.

У роботі отримала подальший розвиток теорія гвинтів БПЛА у питаннях оптимізації параметрів гвинтів – розроблено алгоритм розрахунку параметрів гвинта БПЛА з урахуванням форми та кількості лопатей гвинта.

Ковтун Артем Анатолійович опублікував необхідну кількість наукових праць.

Наукові результати, отримані в роботі здобувача, заслуговують на позитивну оцінку, буду підтримувати цю роботу.

В обговоренні дисертаційного дослідження взяли участь:

Терещенко Ю.М., д.т.н., професор, завідувач кафедри авіаційних двигунів КАІ: Представлена робота є цікавою і до здобувача було багато питань. На мою думку, ми повинні підтримати цю роботу. Представлена дисертація є завершеною працею, в якій представлено вирішення важливого науково-прикладного завдання щодо покращення ефективності повітряних гвинтів БПЛА. Тема роботи є актуальною, практичне значення підтверджується актами впровадження. Буду підтримувати представлену роботу.

Мітрахович М.М., д.т.н., проф., заступник директора ДП «Івченко-Прогрес»: викладається зміст виступу.

Робота дуже цікава, має наукову новизну. Практичне значення роботи підтверджується двома довідками про впровадження від АТ «Антонов» та ДП «Івченко-Прогрес». Результати дисертаційної роботи представлено у 5 наукових статтях, опублікованих у журналах, що входять до переліку фахових видань зі спеціальності 142, категорія «Б». Дисертаційна робота відповідає вимогам чинного Порядку присудження ступеня доктора філософії та скасування рішення разової спеціалізованої вченої ради закладу вищої освіти, наукової установи про присудження ступеня доктора філософії. Буду підтримувати представлену роботу.

Єнчев С.В., д.т.н., професор, завідувач кафедри автоматизації та енергоменеджменту КАІ.

Представлена робота має наукову новизну та практичну значимість, приєднуюсь до висловлень колег. Дисертаційна робота заслуговує на позитивну оцінку, буду підтримувати цю роботу.

ВИСНОВОК

про наукову новизну, теоретичне та практичне значення результатів дисертації Ковтуна Артема Анатолійовича на тему “Оптимізація параметрів повітряного гвинта силової установки безпілотного літального апарату”, поданої на здобуття ступеня доктора філософії з галузі знань 14 “Електрична інженерія” за спеціальністю 142 “Енергетичне машинобудування”

1. Обґрунтування вибору теми дослідження. Сучасні безпілотні літальні апарати (БПЛА) відіграють ключову роль у різних галузях, включаючи сільське господарство, моніторинг навколишнього середовища, доставку вантажів, пошуково-рятувальні операції та військове застосування. Зі збільшенням попиту на БПЛА, вимоги до їх ефективності та екологічності зростають. Важливим питанням є зниження шуму безпілотних літальних апаратів, який негативно впливає на місцевих жителів, тварин на фермі. При проведенні військових або пошуково-рятувальних операцій акустичні характеристики безпілотних літальних апаратів - один з факторів, що визначає успіх місії.

Характеристики БПЛА залежать від багатьох чинників, одним із яких виступає повітряний гвинт. Оптимізація параметрів повітряних гвинтів БПЛА дозволить підвищити коефіцієнт корисної дії (ККД), знизити акустичне випромінювання, покращити маневреність, збільшити тривалість польоту, підвищити вантажопідйомність та знизити енергоспоживання. Це особливо актуально для малорозмірних БПЛА, які часто обмежені запасом енергії та вагою корисного навантаження. Підвищення ефективності гвинтів малорозмірних БПЛА сприяє розвитку екологічно чистих та економічно вигідних рішень у галузі безпілотних технологій.

Дисертаційну роботу присвячено вирішенню науково-прикладного завдання підвищення ефективності гвинтів малорозмірних безпілотних літальних апаратів, що залишається до кінця не розв’язаним. Тема роботи є актуальною і має важливе наукове та практичне значення.

2. Зв’язок роботи з науковими програмами, планами, темами, грантами. Робота виконана на кафедрі авіаційних двигунів КАІ. Подана робота є ініціативною і одночасно складовою частиною досліджень, що проводяться в КАІ та спрямована на підвищення ефективності та економічності лопаткових машин (Науково-дослідна робота №15-2022/07.01.03 «Підвищення ефективності лопаткових машин авіаційних двигунів і газотурбінних установок»).

Робота відповідає основним напрямам Стратегії відродження вітчизняного авіабудування на період до 2030 року (розпорядження Кабінету Міністрів України від 8.07.2020 р. №851-р), та Державній цільовій науково-технічній програмі розвитку авіаційної промисловості на 2021-2030 роки (постанова Кабінету Міністрів України №951 від 01.09.2021р.).

Тема дисертації відповідає освітньо-науковій програмі “Енергетичне машинобудування” за спеціальністю 142 “Енергетичне машинобудування” галузі знань 14 “Електрична інженерія” в КАІ (зокрема, ОК 1.3.2, ОК 1.3.3 та ОК 1.3.5).

3. Мета і завдання дослідження.

Мета роботи - підвищення ККД та зниження рівня звукового тиску у

ближньому полі гвинта БПЛА шляхом оптимізації параметрів повітряного гвинта силової установки безпілотної літальної апаратури.

Для досягнення поставленої мети були поставлені та вирішені наступні завдання:

- проаналізувати методи дослідження течії у повітряних гвинтах малорозмірних БПЛА, провести вибір моделі турбулентної в'язкості;
- розробити алгоритм розрахунку параметрів повітряного гвинта силової установки БПЛА за допомогою оптимізації його параметрів
- дослідити вплив форми та кількості лопатей на ККД повітряного гвинта.
- дослідити вплив форми та кількості лопатей на рівень звукового тиску повітряного гвинта у ближньому полі.

4. Об'єкт дослідження - повітряний гвинт силової установки малорозмірного безпілотної літальної апаратури.

5. Предмет дослідження - ККД та рівень звукового тиску повітряного гвинта силової установки малорозмірного безпілотної літальної апаратури.

6. Методи дослідження. Теоретична частина дослідження ґрунтується на методах теорії лопаткових машин та методах примежового шару, за допомогою яких спроектовані досліджувані гвинти; експериментальна частина дослідження ґрунтується на методах числового експерименту та методах математичного моделювання, які дозволили дослідити характеристики повітряних гвинтів; методах оптимізації та методах аналізу і синтезу, на основі яких проведено оптимізацію параметрів повітряних гвинтів БПЛА.

7. Наукова новизна дослідження: базується на таких основних положеннях:
уперше:

- проведено оцінку ККД та рівня звукового тиску у ближньому полі гвинта малорозмірного БПЛА типу квадрокоптер з широкохордними лопатями методом числового експерименту;

удосконалено:

- повітряний гвинт БПЛА, який забезпечує високий ККД та низький рівень шуму в заданому діапазоні сили тяги;

отримала подальший розвиток:

- теорія повітряних гвинтів БПЛА у питаннях оптимізації параметрів гвинтів – розроблено алгоритм розрахунку параметрів гвинта БПЛА з урахуванням форми та кількості лопатей гвинта;

- дослідження аероакустичних характеристик повітряних гвинтів БПЛА типу квадрокоптер.

8. Теоретичне значення. Дисертація містить нові науково обґрунтовані результати досліджень щодо оптимізації параметрів повітряних гвинтів силових установок БПЛА, які мають істотне значення для галузі енергетичне машинобудування.

9. Практичне значення та використання результатів дисертаційного дослідження. Застосування у практиці створення повітряних гвинтів силових установок БПЛА отриманих рекомендацій щодо вибору форми та кількості лопатей гвинта БПЛА з метою покращення аероакустичних характеристик та удосконаленого алгоритму оптимізації параметрів гвинта БПЛА дозволять

підвищити ефективність застосування БПЛА.

Практичне значення отриманих результатів підтверджується довідками про впровадження результатів, що одержані у дисертаційній роботі, на ДП «Івченко-Прогрес» (довідка про впровадження № 35/5074-39 від 11.09.2024). та АТ «Антонов» (довідка про впровадження № 1/704 від 10.09.2024).

10. Особистий внесок здобувача. Дисертація «Оптимізація параметрів повітряного гвинта силової установки безпілотного літального апарату» Ковтуна Артема Анатолійовича є самостійною науковою працею, в якій наведено теоретичні положення і висновки, власні ідеї та розробки автора, які дають змогу вирішити поставлені завдання. Усі висновки та практичні рекомендації, винесені на захист, розроблені дисертантом особисто. Використані в дисертації ідеї, положення чи гіпотези інших авторів мають відповідні посилання і використані лише для підкріплення ідей здобувача.

11. Апробація результатів дослідження. Найважливіші ідеї, висновки, рекомендації, отримані в дисертації, оприлюднені на наукових та науково-практичних конференціях, у тому числі міжнародних, всеукраїнських та за міжнародною участю: «Промислова гідравліка і пневматика» (Київ, 2022); Міжнародний Конгрес двигунобудівників (Харків, 2023); «Modern research in technical sciences: the impact of martial law in Ukraine» (Рига, Латвія, 2024); Міжнародний Конгрес двигунобудівників (Харків, 2024).

12. Публікації. Основні положення та результати дисертаційного дослідження викладено в 12 наукових публікаціях, серед них 5 публікацій у наукових фахових виданнях України, 7 публікацій у збірниках матеріалів конференцій.

Список опублікованих праць за темою дисертації

Статті у наукових фахових виданнях України:

1. Дулепов А. А., Глобін Є. В., Ковтун А. А., Хижняк М. В., Балалаєва К. В. Тестова задача моделювання течії у ступені компресора Rotor 37. *Авіаційно-космічна техніка і технологія*. 2023. №4 (188). С. 28-34. doi:10.32620/aktt.2023.4.09.

Особистий внесок Дулепов А.А. - формулювання проблеми, проведення моделювання течії, аналіз отриманих результатів.

Особистий внесок Глобін Є. В. - огляд та аналіз інформаційних джерел, проведення моделювання течії, аналіз отриманих результатів.

Особистий внесок Ковтун А. А. - огляд та аналіз інформаційних джерел, проведення моделювання течії, аналіз отриманих результатів.

Особистий внесок Хижняк М. В. - формулювання проблеми, формулювання висновків.

Особистий внесок Балалаєва К. В. - формулювання проблеми, аналіз отриманих результатів, формулювання висновків.

2. Балалаєва К. В., Балалаєв А. В., Голембієвський Г. Г., Ковтун А. А. Характеристики повітряного гвинта квадрокоптера. *Авіаційно-космічна техніка і технологія*. 2023. №4 (189) спецвыпуск №1. С. 23-28. doi:10.32620/aktt.2023.4sup1.04.

Особистий внесок Балалаєва К.В. - формулювання проблеми, оцінка ефективності гвинта та акустичних характеристик, формулювання висновків.

Особистий внесок Балалаєв А.В. - формулювання проблеми, оптимізація кутів викладки вуглепластика з мінімізацією прогину, формулювання висновків.

Особистий внесок Голембієвський Г. Г. - огляд та аналіз інформаційних джерел, оптимізація кутів викладки вуглепластика з мінімізацією прогину.

Особистий внесок Ковтун А. А. - формулювання проблеми, огляд та аналіз інформаційних джерел, оцінка ефективності гвинта та акустичних характеристик.

3. Ковтун А. А. Вплив форми та кількості лопатей на коефіцієнт корисної дії гвинта БПЛА. *Авіаційно-космічна техніка і технологія*. 2024. №4 (197) спецвипуск №1. С. 31-37. doi: 10.32620/aktt.2024.4sup1.05.

4. Ковтун А. А. Акустичні характеристики гвинта БПЛА. *Авіаційно-космічна техніка і технологія*. 2024. №4 (198) спецвипуск №1. С. 12-17. doi: 10.32620/aktt.2024.sup2.02.

5. Ковтун А.А., Мельченко А.І., Балалаєва К.В., Усенко В.Ю. Акустичне випромінювання закапотованого гвинта БПЛА. *Авіаційно-космічна техніка і технологія*. 2024, №4 (196). С. 58-63. doi: 10.32620/aktt.2024.4.07.

Особистий внесок Ковтун А.А. - огляд та аналіз інформаційних джерел, постановка задачі, побудова моделі та проведення моделювання, оцінка результатів.

Особистий внесок Мельченко А.І. - огляд та аналіз інформаційних джерел, побудова моделі та проведення моделювання, оцінка результатів, формулювання висновків.

Особистий внесок Балалаєва К.В. - формулювання проблеми, постановка задачі, оцінка результатів.

Особистий внесок Усенко В.Ю. - формулювання проблеми, оцінка результатів.

Наукові праці, які додатково відображають наукові результати дисертації:

6. Балалаєва К. В., Балалаєв А. В., Голембієвський Г. Г., Ковтун А. А. Розрахунок характеристик повітряного гвинта квадрокоптера // XXVIII - міжнародний конгрес двигунобудівників: тези доповідей. Харків, 2023. С. 22.

7. Дулепов А. А., Глобін Є. В., Ковтун А. А., Хижняк М. В., Балалаєва К. В. Моделювання течії у ступені компресора Rotor 37 // XXVIII - міжнародний конгрес двигунобудівників: тези доповідей. Харків, 2023. С.26-27.

8. Kovtun A.A., Balalaieva K. V. Test problem of modeling the flow around the propeller of an unmanned aerial vehicle // Modern research in technical sciences: the impact of martial law in Ukraine: proceeding of International scientific conference. Riga, Latvia : Baltija Publishing, 2024. P. 31-33.

9. Ковтун А. А. Визначення рівня акустичного тиску гвинта БПЛА // XXIX - міжнародний конгрес двигунобудівників: тези доповідей. Харків, 2024. С.15.

10. Ковтун А. А. Визначення впливу форми та кількості лопатей на ККД гвинта квадрокоптера // XXIX - міжнародний конгрес двигунобудівників: тези доповідей. Харків, 2024. С.14-15.

11. Ковтун А. А., Мельченко А.І., Балалаєва К.В., Усенко В.Ю. Оцінка

потенційний конфлікт інтересів щодо здобувача Ковтуна Артема Анатолійовича (зокрема, є його близькою особою) та/або його наукового керівника.

У результаті попередньої експертизи дисертації Ковтуна Артема Анатолійовича і повноти публікації основних результатів дослідження

УХВАЛЕНО:

1. Затвердити висновок про наукову новизну, теоретичне та практичне значення результатів дисертації Ковтуна Артема Анатолійовича на тему “Оптимізація параметрів повітряного гвинта силової установки безпілотного літального апарату”.

2. Вважати, що за актуальністю, ступенем новизни, обґрунтованістю, науковою та практичною цінністю здобутих результатів дисертація Ковтуна Артема Анатолійовича відповідає спеціальності 142 “Енергетичне машинобудування” та вимогам Порядку підготовки здобувачів вищої освіти ступеня доктора філософії та доктора наук у вищих навчальних закладах (наукових установах), затвердженого постановою Кабінету Міністрів України від 23 березня 2016 року. № 261 (зі змінами і доповненнями від 03 квітня 2019 року № 283), вимогам пп. 6, 7, 8, 9 “Порядку присудження ступеня доктора філософії та скасування рішення разової спеціалізованої вченої ради закладу вищої освіти, наукової установи про присудження ступеня доктора філософії”, затвердженому постановою Кабінету Міністрів України від 12 січня 2022 року № 44.

3. Рекомендувати дисертаційну роботу “Оптимізація параметрів повітряного гвинта силової установки безпілотного літального апарату”, подану Ковтуном Артемом Анатолійовичем на здобуття ступеня доктора філософії з галузі знань 14 “Електрична інженерія”, за спеціальністю 142 “Енергетичне машинобудування”.

4. Рекомендувати Вченій раді затвердити склад разової спеціалізованої вченої ради:

Голова ради:

Єнчев Сергій Васильович, доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри автоматизації та енергоменеджменту Аерокосмічного факультету КАІ.

Рецензенти:

Якушенко Олександр Сергійович, кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри авіаційних двигунів Аерокосмічного факультету КАІ;

Волянська Лариса Георгіївна, кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри авіаційних двигунів Аерокосмічного факультету КАІ.

Офіційні опоненти:

Усатий Олександр Павлович, доктор технічних наук, старший науковий співробітник, завідувач кафедри турбінобудування Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут».

Алексєєнко Сергій Вікторович, доктор технічних наук, професор, професор кафедри технологій машинобудування та матеріалознавства Національного технічного університету

«Дніпровська політехніка».

Результати голосування щодо рекомендації до захисту дисертації Ковтуна
Артема Анатолійовича:

“за” – 13

“проти” – немає

“утримались” – немає

Головуючий на засіданні:

завідувач кафедри авіаційних двигунів
КАІ, д.т.н., професор

Юрій ТЕРЕЩЕНКО

Секретар засідання:

старший викладач кафедри авіаційних
двигунів КАІ

Галина НІКІТИНА

ПОГОДЖЕНО:

Проректор з наукових досліджень та
трансферу технологій КАІ,
д.т.н., професор

Сергій ГНАТЮК