

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
НАЦІОНАЛЬНИЙ АВІАЦІЙНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

**БАЛАЛАСЬВ АНТОН ВАЛЕРІЙОВИЧ**

УДК 629.7.036(043.3)

**ХАРАКТЕРИСТИКИ РЕШІТЧАСТОГО ДВОРЯДНОГО  
РОБОЧОГО КОЛЕСА ВЕНТИЛЯТОРА ДВОКОНТУРНОГО  
ТУРБОРЕАКТИВНОГО ДВИГУНА**

05.05.03 – двигуни та енергетичні установки

**Автореферат**  
дисертації на здобуття наукового ступеня  
кандидата технічних наук

Київ 2021

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана в Національному авіаційному університеті на кафедрі авіаційних двигунів.

- Науковий керівник      доктор технічних наук, професор  
**Терещенко Юрій Матвійович**,  
Національний авіаційний університет,  
завідувач кафедри авіаційних двигунів.
- Офіційні опоненти:      доктор технічних наук, старший науковий співробітник  
**Дихановський Віктор Миколайович**,  
Центральний науково-дослідний інститут озброєння  
та військової техніки Збройних Сил України,  
начальник науково-дослідного відділу;
- кандидат технічних наук  
**Усенко Вячеслав Юрійович**,  
Державне підприємство «Антонов»,  
начальник відділу силових установок.

Захист дисертації відбудеться « 20 » квітня 2021 року о 12<sup>00</sup> годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 26.062.05 у Національному авіаційному університеті за адресою: 03058, Київ, просп. Любомира Гузара, 1, 1.131.

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Національного авіаційного університету за адресою: 03058, Київ, просп. Любомира Гузара, 1 та на сайті університету <https://nau.edu.ua/> у розділі «Університет» – «Спеціалізовані вчені ради».

Автореферат розісланий « 19 » березня 2021 р.

Вчений секретар  
спеціалізованої вченої ради Д 26.062.05  
кандидат технічних наук, доцент



Т. О. Семитківська

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

**Актуальність теми.** Безпечний, надійний, більш ефективний і екологічно чистий повітряний транспорт – нагальна потреба сучасного суспільства. Силова установка літального апарату багато в чому визначає його ефективність та економічність. Конкурентноспроможний двигун повинен мати високі тягові, економічні, масогабаритні та інші експлуатаційні характеристики. Один із шляхів підвищення економічності авіаційних двигунів, що обрали світові авіаційні компанії є підвищення ступеня двоконтурності, що в свою чергу вимагає розробку надійних ефективних вентиляторів. До таких вентиляторів висуваються наступні вимоги: високий рівень ефективності, високий коефіцієнт корисної дії (ККД); високий рівень надійності; мала вага при заданих габаритних розмірах; низький рівень шуму; низький рівень вібрації та інше.

Управління пограничним шаром дозволяє вирішити задачу підвищення ефективності вентиляторів авіаційних двигунів. В теорії управління пограничним шаром розрізняють активні і пасивні методи. Недолік застосування активних методів управління пограничним шаром в напрямних апаратах і робочих колесах осьових вентиляторів є додаткове підведення енергії і складність конструкції. Серед пасивних методів управління пограничним шаром слід зазначити застосування дворядних лопаткових вінців. Застосування дворядних лопаткових вінців в робочих колесах осьових компресорів дозволяє збільшити аеродинамічну навантаженість ступенів компресора, зменшити вагу та габаритні розміри двигуна, розширити діапазон стійкої роботи компресора. Заміна однорядних лопаткових вінців на дворядні дозволяє збільшити кут повороту потоку за рахунок зменшенню кута відставання потоку. Збільшення кута повороту потоку призводить до збільшення закрутки потоку в міжлопатковому каналі, що, в свою чергу, призводить до збільшення ефективної роботи компресора при незмінній окружній швидкості. Як наслідок ступінь підвищення тиску з дворядним лопатковим робочим колесом (РК) збільшується.

Однак дворядні лопаткові вінці мають зменшений рівень жорсткості в порівнянні з однорядними за рахунок зменшення довжини хорд лопаток першого і другого ряду. Один із шляхів вирішення цієї проблеми є застосування решітчастих дворядних лопаткових вінців.

В аеродинаміці відомі роботи, щодо створення решітчастих крил, які мають високі аеродинамічні характеристики. Дворядну лопатку з перетинками можна розглядати як частковий випадок решітчастого крила. Однак до теперішнього часу не було досліджено характеристики дворядного РК.

Дисертаційну роботу присвячено вирішенню науково-прикладної задачі підвищення ефективності лопаткових вінців вентиляторів двоконтурних турбореактивних двигунів шляхом застосування решітчастих дворядних робочих коліс. Тема роботи є актуальною і має важливе наукове та народногосподарське значення.

### **Зв'язок роботи з науковими програмами, планами і темами**

Робота виконана на кафедрі авіаційних двигунів Національного авіаційного університету. Вона ґрунтується на результатах досліджень, що

пов'язані з виконанням держбюджетних науково-дослідних робіт і завдань, у яких здобувач брав участь як співвиконавець окремих розділів, відповідальний виконавець: НДР № 703-ДБ09 «Розвиток методів дослідження граничного стану елементів конструкції у силових та температурних полях при статичному, циклічному та ударному навантаженні» (2009–2012 рр.); НДР № 733-ДБ12 «Дослідження гібридних композиційних матеріалів за критеріями міцності для застосування при створенні безпілотного повітряного судна» (2012–2013 рр.) – співвиконавець; НДР № 123-ДБ17 «Граничний стан пластинкових конструктивних елементів авіаційної техніки з композиційних матеріалів при статичному і ударному навантаженні» (2017–2019 рр.) – співвиконавець; НДР № 25-2020/07.01.03 «Дослідження шляхів вдосконалення аеродинаміки багаторядних лопаткових вінців високонапірних компресорів і вентиляторів газотурбінних двигунів» (2020–2021 рр.) – відповідальний виконавець.

Дисертаційна робота є складовою частиною досліджень, що проводяться в Національному авіаційному університеті і спрямовані на покращення параметрів та характеристик ГТД літаків цивільної та військової авіації в широкому діапазоні експлуатаційних режимів.

Роботу виконано відповідно до Стратегії відродження українського авіабудування на період до 2022 р., схваленої розпорядженням Кабінету Міністрів України № 429-р. 10.05.2018 р.

#### **Мета і задачі дослідження**

Метою дослідження є підвищення ефективності робочих коліс вентиляторів двоконтурних турбореактивних двигунів шляхом застосування решітчастих дворядних робочих коліс.

Досягнення мети передбачає вирішення наступних задач:

1. Моделювання течії у вентиляторі ТРДД з дворядним робочим колесом.
2. Дослідження аеродинамічних характеристик решітчастих дворядних РК вентилятора ТРДД.
3. Дослідження частотних характеристик власних коливань однорядних та решітчастих дворядних лопаток робочих коліс вентилятора ТРДД.
4. Удосконалення методики вибору параметрів решітчастого дворядного робочого колеса вентилятора ТРДД з урахуванням спектру частот власних коливань.

**Об'єкт дослідження** – решітчасте дворядне робоче колесо вентилятора ТРДД.

**Предмет дослідження** – робочий процес решітчастого дворядного робочого колеса вентилятора ТРДД.

**Методи досліджень.** У роботі використовуються сучасні теоретичні методи та метод чисельного експерименту. Теоретична частина роботи ґрунтується на результатах фундаментальних досліджень в теорії управління пограничним шаром, теорії лопаткових вінців турбомашин, міцності робочих коліс компресорів та вентиляторів. Експериментальна частина роботи ґрунтується на використанні методу чисельного експерименту.

Результати чисельних досліджень порівнювались з результатами відомих натурних фізичних експериментів.

**Достовірність отриманих результатів** роботи забезпечується коректним застосуванням математичного апарату для вирішення поставлених наукових задач та підтверджується хорошим узгодженням результатів розрахункових досліджень з результатами фізичних експериментів та досліджень інших авторів, виконаних за апробованими методиками.

**Наукова новизна отриманих результатів:**

1. Вперше отримано характеристики решітчастого дворядного робочого колеса вентилятора ТРДД методом чисельного експерименту.
2. Удосконалено методику вибору параметрів решітчастого дворядного РК вентилятора ТРДД з урахуванням спектру частот власних коливань.
3. Отримала подальший розвиток теорія дворядних лопаткових вінців в частині характеристик решітчастих дворядних лопаткових вінців з великим подовженням.

**Практична значимість роботи** полягає у можливості використання отриманих автором рекомендацій щодо проектування решітчастих дворядних робочих коліс і удосконаленої методики проектування дворядних робочих коліс вентиляторів при проектуванні ТРДД нового покоління або при модернізації існуючих ТРДД.

Практичне значення отриманих результатів підтверджується актами реалізації результатів роботи у ДП «Антонов» та актом реалізації результатів роботи в навчально-виховний процес Національного авіаційного університету.

**Особистий внесок здобувача визначається такими положеннями**

Основні результати, ідеї досліджень, концепція роботи, її положення та принципи вирішення задач розроблені автором самостійно.

У наукових працях автора, що опубліковані у співавторстві, здобувачем: зроблено проектування та тестування вузла стенду для дослідження міцнісних характеристик модельних композиційних лопаток [1]; проведено чисельний експеримент з дослідження коливань дворядної робочої лопатки ступеня осьового компресора [2]; проведено чисельний експеримент з дослідження власних коливань дворядної робочої лопатки вентилятора [3]; проведено чисельний експеримент з дослідження кута стрілоподібності лопаток на аеродинамічну навантаженість вентилятора двоконтурного турбореактивного двигуна [5]; проаналізовано міцнісні характеристики композиційних матеріалів [6]; проведено чисельний експеримент з моделювання течії в ступені осьового компресора, проаналізовано результати [8]; проаналізовано застосування дворядних лопаткових вінців в елементах вентилятора газотурбінного двигуна [9]; проаналізовано вплив ефекту стріловидності лопаток в дозвукових компресорах і вентиляторах газотурбінних двигунів [11]; здійснено підготовку експериментальних зразків, підготовку та налаштування обладнання, проведено експеримент, зроблено аналіз експериментальних даних [12, 13].

Апробація результатів роботи та публікації. Основні теоретичні положення, результати та висновки наукового дослідження доповідались автором, обговорювались та отримали позитивну оцінку на наукових семінарах кафедри авіаційних двигунів Національного авіаційного університету (м. Київ, Україна,

2018–2020 рр.); міжкафедральному семінарі Національного авіаційного університету (м. Київ, Україна, 2021 р.); The Eighth World Congress “Aviation in the XXI-st century” (м. Київ, Україна, 2018 р.); The Ninth World Congress “Aviation in the XXI-st century” (м. Київ, Україна, 2020 р.); XXI Міжнародна науково-технічна конференція АС ПГП Промислова гідравліка і пневматика (м. Київ, Україна, 2020 р.); The 12th International scientific and practical conference “Topical issues of the development of modern science” (м. Софія, Болгарія, 2020 р.), XXV Міжнародний Конгрес двигунобудівників (м. Харків, Україна, 2020 р. онлайн), XVII науково-технічна конференція студентів, аспірантів, докторантів та молодих учених «Інноваційні технології» (м. Київ, Україна, 2020 р.).

**Публікації.** Основні результати дисертації представлено у 3 наукових статтях у закордонних журналах, 3 наукових статтях, опублікованих у журналах, що входять до переліку фахових видань України з технічних наук, у тому числі 1 статті у журналі, що індексується наукометричною базою SCOPUS; 7 тезах і матеріалах конференцій.

**Структура дисертації.** Дисертація складається з анотації, вступу, 4 розділів, висновків, списку використаної літератури та 1 додатку. Основний матеріал викладено на 105 сторінках, 37 рисунках, 1 таблиці. Бібліографія містить 168 найменувань робіт на 18 сторінках. Загальний обсяг дисертації складає 144 сторінки.

## ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

**У вступі** обґрунтовано актуальність теми дисертації, сформульовані наукове завдання, мета і задачі дослідження, охарактеризовані наукова новизна, теоретична й практична цінність отриманих наукових результатів, визначено особистий внесок здобувача в одержані результати досліджень та впровадження результатів роботи.

**У першому розділі** наведено огляд сучасного стану загальної проблеми підвищення ефективності вентиляторів турбореактивних двоконтурних двигунів (ТРДД).

Вагомий внесок у вирішення проблеми підвищення ефективності осьових компресорів та вентиляторів ТРДД внесли представники світової та української наукових шкіл, зокрема видатні вчені: Холщевников К. В., Нечаєв Ю. М., Шляхтенко С. М., Клячкін О. Л., Ольштейн Л. Є., Брусиловський Й. В., Самойлович Г. С., Люлька А. М., Гіневський А. С., Кравченко І. Ф., Богуслаєв В. О., Іноземцев О. О., Федоров Р. М., Єршов В. М., Бойко А. В., Бойко Л. Г., Єршов С. В., Русанов А. В., Терещенко Ю. М., Мітрахович М. М., Дихановський В. М. та ін. У розділі приведено критичний аналіз основних тенденцій розвитку літаків, тенденцій розвитку ГТД, сформульовано вимоги до вентиляторів перспективних ГТД.

Проаналізовано методи управління пограничним шаром, які дозволяють підвищити ефективність осьових вентиляторів і компресорів. Зазначено, що покращення економічності газотурбінних двигунів залежить від підвищення повного ККД. Підвищення повного ККД, по-перше, пов'язано з вдосконаленням термодинамічного циклу, по-друге, залежить від підвищення тягового ККД.

ТГвВД мають достатньо високий тяговий ККД. Таким чином, підвищення повного ККД ТГвВД дозволить отримати високоекономічний конкурентоспроможний двигун вітчизняного виробництва.

Проведений аналіз показав, що одним із основних недоліків ТГвВД є високий рівень шуму на місцевості і в салоні літака. Аналіз літературних джерел показав, що застосування дворядних лопаткових вінців дозволяє покращити ефективність вентиляторів та компресорів: збільшити напірність, зменшити вагу та габарити, покращити акустичні характеристики. Однак при застосуванні їх у лопаткових вінцях вентиляторів ТРДД з великим ступенем двоконтурності виникає проблема забезпечення достатнього рівня надійності.

Поряд з тим, дворядні лопаткові вінці мають зменшений рівень жорсткості в порівнянні з однорядними за рахунок зменшення хорд лопаток першого і другого ряду.

Один із шляхів вирішення цієї проблеми є застосування решітчастих дворядних лопаткових вінців.

Проведений літературний огляд показав, що в аеродинаміці відомі роботи щодо створення решітчастих крил, які мають високі аеродинамічні характеристики.

Дворядну лопатку з перетинками можна розглядати як частковий випадок решітчастого крила. Однак до теперішнього часу не досліджено характеристики решітчастого дворядного робочого колеса.

**У другому розділі** розглядається задача моделювання течії в дворядному вентиляторі двоконтурного турбореактивного двигуна.

Проведено вибір та обґрунтування параметрів чисельного експерименту для моделювання течії в елементах вентилятора.

В роботі представлені результати двох тестових задач: моделювання течії в дворядній решітці аеродинамічних профілів та в ступені осьового компресора. Результати чисельного експерименту порівнювалися з результатами фізичного експерименту. Проведене дослідження показує, що при моделюванні течії в дворядній решітці при замиканні рівнянь Нав'є-Стокса моделями турбулентності SST і k- $\epsilon$  похибка розрахунку склала від 2 до 4,6 % і від 3 % до 7,2 % відповідно. Моделювання течії в ступені осьового компресора проводилось при значенні коефіцієнта швидкості  $\lambda = 0,36 \dots 0,64$  в діапазоні відносної швидкості обертання від 0,8 до 0,6. Порівняння результатів чисельного розрахунку з експериментальними даними показало, що при використанні для замикання рівнянь Нав'є-Стокса моделі турбулентності k-Omega, k-Epsilon EARSM і SST показали похибку розрахунку до 2 %. Надалі при подібних розрахунках течії в ступенях осьового компресора планується використовувати модель турбулентності SST.

В роботі представлено чисельний розрахунок течії у вентиляторі з однорядним та еквівалентним дворядним робочим колесом. Як показав літературний огляд, використання еквівалентних дворядних лопаткових вінців в елементах статора осьового компресора дозволяє розширити діапазон безвідривного обтікання. При використанні ж дворядних лопаткових вінців в робочих колесах

підвищується ступінь підвищення тиску ступені та існує можливість знизити габаритні розміри і вагу компресора або вентилятора з дворядними РК.

В даному підрозділі було поставлено завдання побудувати твердотільну модель робочого колеса з дворядними лопатками на основі вже наявних у відкритому доступі рекомендацій і отримати напірну характеристику вентилятора з дворядним РК на основі моделювання течії в досліджуваному вентиляторі.

Моделювання течії було виконано за допомогою чисельного експерименту. При замиканні системи рівнянь Нав'є-Стокса використовувалася модель турбулентності SST Ментера. Розрахункова сітка – неструктурована, з адаптацією прикордонного шару. Досліджувалися два робочих колеса вентилятора (рис. 1): однорядне і еквівалентне дворядне.

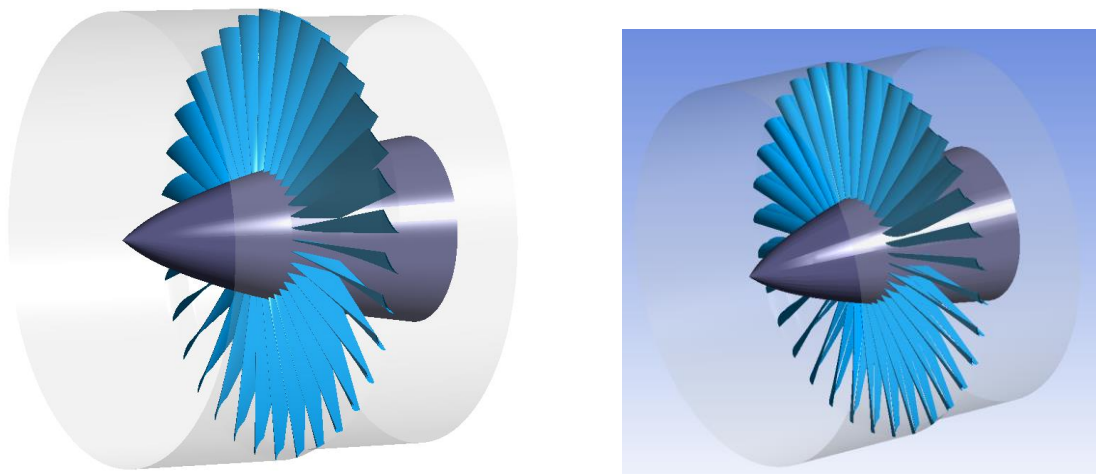


Рисунок 1. Твердотільні моделі вентилятора с однорядним і дворядним РК

Лопатковий вінець складався з 33 лопаток, зовнішній діаметр на вході в РК 2,37 м, втулковий діаметр – 0,652 м. Моделювання течії проводилось в діапазоні осьової швидкості на вході від 80 до 200 м/с при частоті обертання ротора 2202 об/хв, 2848 об/хв і 3010 об/хв. Згідно з рекомендаціями, запропонованими Терещенко Ю. М., хорда першого ряду в досліджуваному дворядному РК становила 60 % від сумарної хорди профілю, довжина щільного каналу – 10 % від сумарної хорди.

На основі розрахунку течії в однорядному і еквівалентному дворядному РК вентилятора були отримані напірні характеристики у вигляді залежностей ступеня підвищення тиску від газодинамічної функції витрати (рис. 2).

Ступінь підвищення тиску розраховувався як відношення повного тиску за РК до повного тиску на вході в РК:

$$\pi = \frac{P_2^*}{P_1^*}.$$

Аналіз результатів розрахунків показав, що ступінь підвищення тиску у вентиляторі з дворядним РК зростає від 0,32 до 20 % для режиму роботи при частоті обертання  $n = 2202$  об/хв.,  $n = 2848$  об/хв., та  $n = 3010$  об/хв. в діапазоні значень газодинамічної функції витрати  $q(\lambda) = 0,4 \dots 1$ .



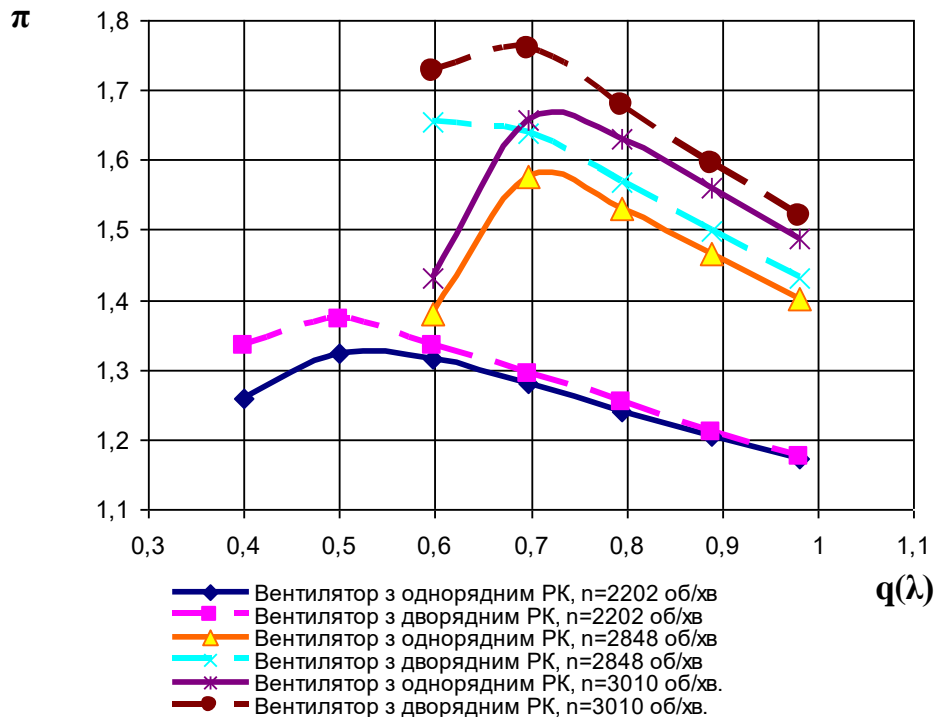


Рисунок 2. Залежність ступеня підвищення тиску від газодинамічної функції витрати для однорядного і дворядного РК вентилятора

У третьому розділі викладено результати дослідження аеродинамічні характеристики вентиляторів з решітчастими дворядними РК. Першим етапом дослідження решітчастих дворядних лопаткових вінців робочого колеса вентилятора було створення решітчастої дворядної лопатки з перетинками. Було висунуто гіпотезу: перетинки повинні бути встановлені з певними кутами установки відповідно лініям току в міжлопаткових каналах досліджуваного лопаткового вінця робочого колеса, тобто для кожної перетинки повинен бути свій кут установки, який відповідає характеру обтікання. За результатами моделювання течії отримано лінії току в міжлопатковому каналі (рис. 3) для дворядного лопаткового вінця робочого колеса вентилятора.

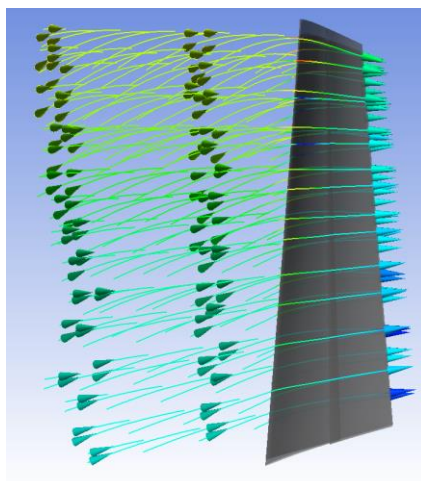


Рисунок 3. Візуалізація ліній току в міжлопатковому каналі дворядного РК вентилятора

Згідно висунутої гіпотези було отримано кути встановлення перетинок між першим і другим рядом лопаток дворядного РК для трьох варіантів решітчастих дворядних РК вентилятора: з однією перетинкою на відносній висоті 50 %, з двома перетинками на відносній висоті 25 % і 75 % і з трьома перетинками на відносній висоті 25 %, 50 % і 75 %.

З метою оцінки аеродинамічних характеристик решітчастих дворядних РК вентилятора було проведено моделювання течії в них.

На рис. 4 показана візуалізація обтікання в вентиляторах при частоті обертання  $n = 2248$  об/хв, швидкість на вході 120 м/с.

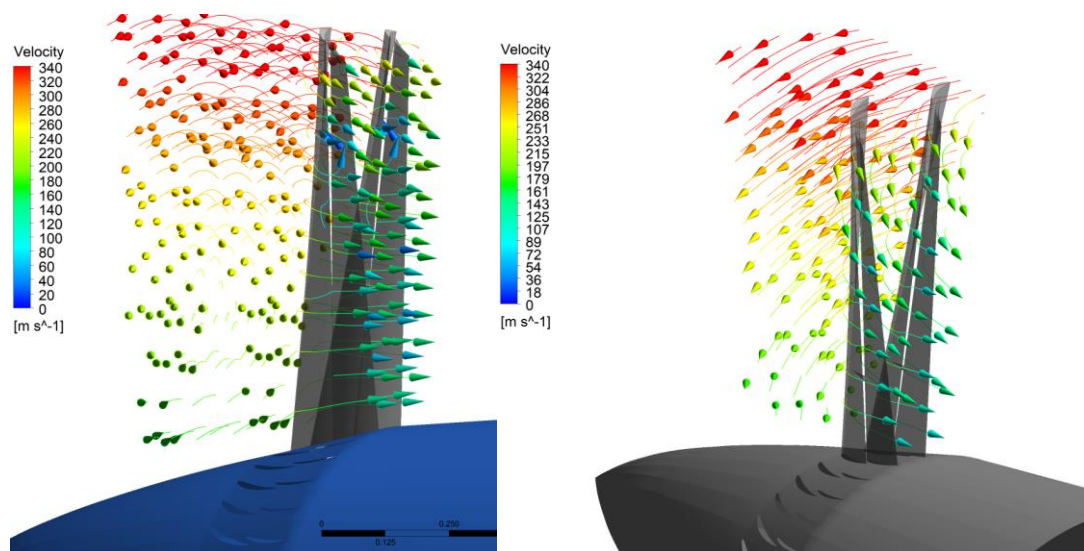


Рисунок 4. Візуалізація обтікання в дворядному РК вентилятора (а) і в решітчастому дворядному РК вентилятора

Аналіз візуалізації обтікання показує, що в дворядному РК вентилятора спостерігається утворення вихорів за робочим колесом. Це негативне явище приводить до зменшення ККД вентилятора. Однією з причин утворення вихорового обтікання в аеродинамічному сліді є наявність нерівномірності потоку в щільовому каналі в дворядних лопаткових вінцях. В той же час, наявність перетинок в щільовому каналі приводить до вирівнювання потоку в щільовому каналі, і, як наслідок, в аеродинамічному сліді за решітчастим дворядним РК рівень нерівномірності потоку зменшується в порівнянні з дворядним РК.

Наступним етапом дослідження була оцінка ефективності вентилятора з решітчастим дворядним РК. Оцінка ефективності вентилятора виконувалась за аналізом залежностей ступеня підвищення тиску від газодинамічної функції витрати  $q(\lambda)$  для режимів роботи вентиляторів при частоті обертання ротора 2202 об/хв., 2848 об/хв. і 3010 об/хв.

Для можливості оцінити переваги решітчастого дворядного РК на графіку зображено залежності ступеня підвищення тиску від газодинамічної функції витрати  $q(\lambda)$  для вентилятора з однорядним РК, дворядним РК і решітчастим РК відповідно з однією перетинкою на відносній висоті 50 %, двома перетинками на відносній висоті лопатки 25 % і 75 %, з трьома перетинками 25 %, 50 %, 75 % (рис. 5).

Аналіз отриманих залежностей показує, що ефективність решітчастих дворядних РК вище, ніж дворядних РК і однорядних РК вентилятора. Решітчасте дворядне РК з трьома перетинками має вищу ефективність, ніж решітчасте дворядне РК з двома та однією перетинкою. Решітчасте дворядне РК з двома перетинками має вищу ефективність, ніж решітчасте дворядне РК з однією перетинкою.

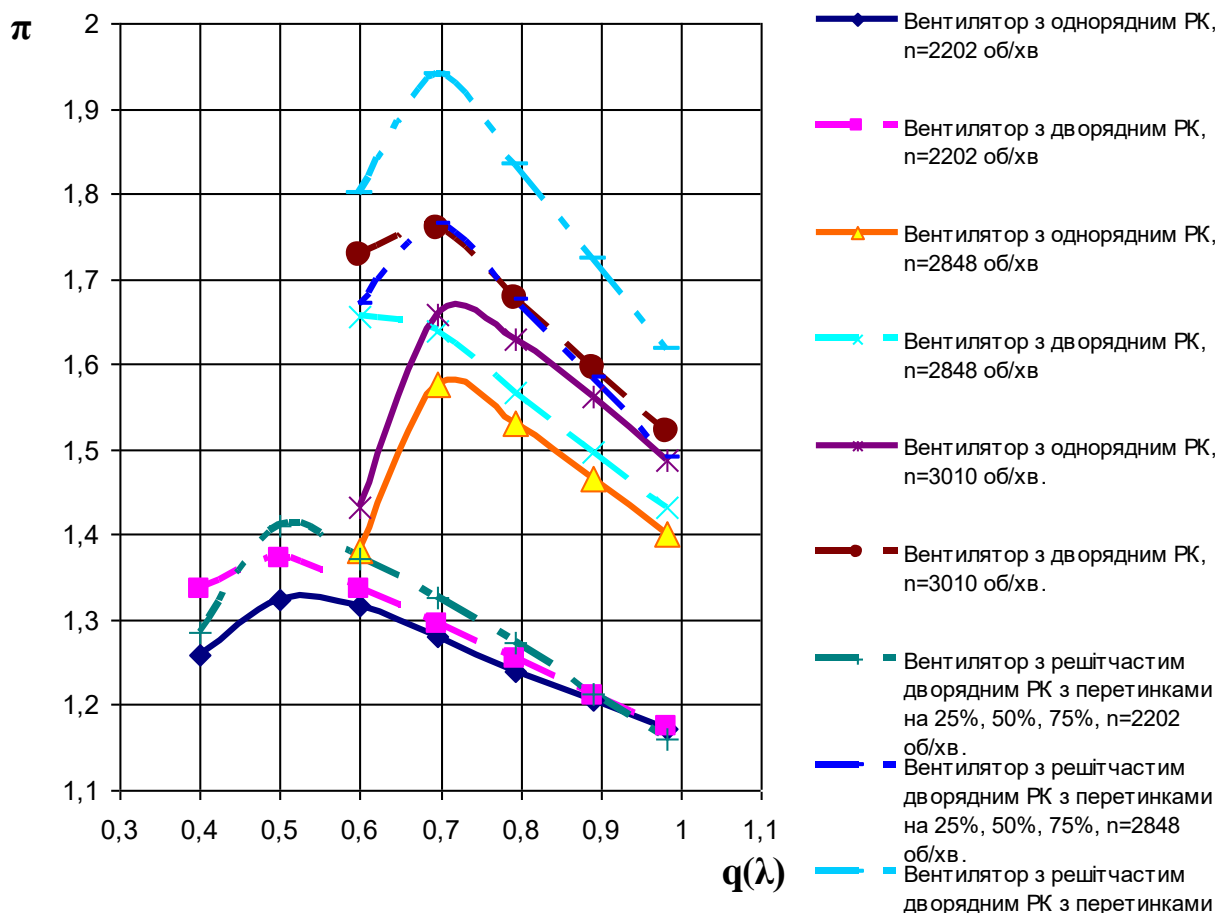


Рисунок 5. Залежність ступеня підвищення тиску від газодинамічної функції витрати  $q(\lambda)$  для вентилятора з решітчастим дворядним РК з перетинками на 25 %, 50 %, 75 % відносної висоти лопатки

На режимі роботи при частоті обертання 2202 об/хв у вентиляторі з решітчастими РК ступінь підвищення тиску зростає на 1...6 % в порівнянні з однорядним РК та 0,3...3 % в порівнянні з дворядним РК.

На режимі роботи при частоті обертання 2848 об/хв у вентиляторі з решітчастими РК ступінь підвищення тиску зростає на 6...21 % в порівнянні з однорядним РК та 1...8 % в порівнянні з дворядним РК.

На режимі роботи при частоті обертання 3010 об/хв у вентиляторі з решітчастими РК ступінь підвищення тиску зростає на 9...26 % в порівнянні з однорядним РК та 4...10 % в порівнянні з дворядним РК.

На рис. 6. показано залежність ступеня підвищення тиску від газодинамічної функції витрати  $q(\lambda)$  для вентилятора з решітчастими дворядними і дворядним РК.

Застосування решітчастого дворядного РК навіть з однією перетинкою дає можливість підвищити ступінь підвищення тиску на 6...9 % в порівнянні з дворядним РК. При збільшенні кількості перетинок приріст ступеня підвищення тиску незначний (до 6 %...10 %).

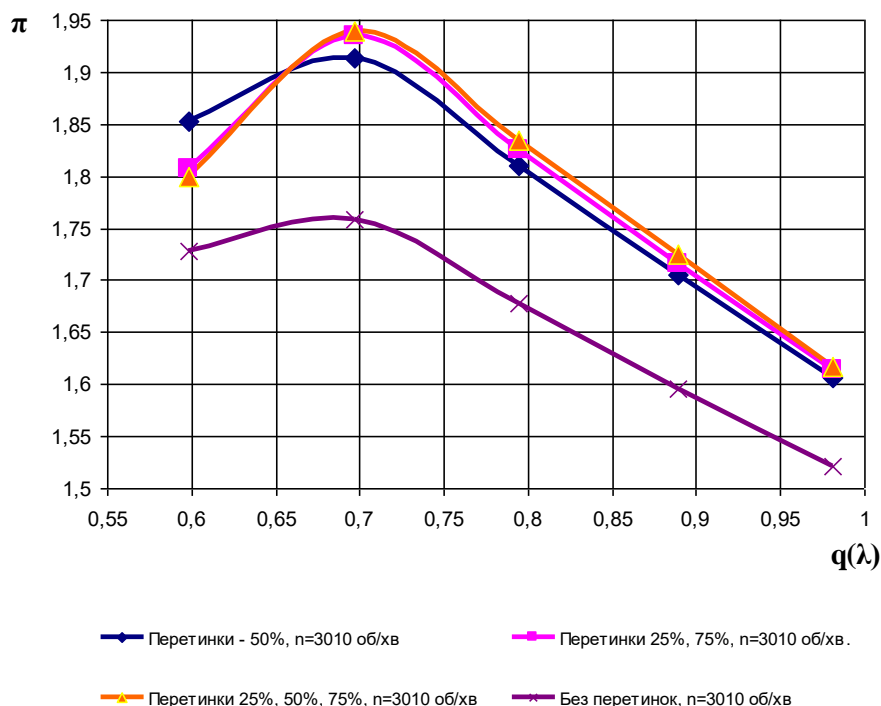


Рисунок 6. Залежність ступеня підвищення тиску від газодинамічної функції витрати  $q(\lambda)$  для вентилятора з решітчастими дворядними РК і дворядним РК (частота обертання 3010 об/хв)

У четвертому розділі надано результати досліджень частотних характеристик власних коливань решітчастих дворядних лопаток вентилятора, та наведено удосконалену методику вибору параметрів решітчастого дворядного РК вентилятора.

Робочі колеса компресорів відносяться до найбільш напружених елементів конструкції авіаційних газотурбінних двигунів. Досить суттєво загальну вібраційну напруженість підвищують коливання робочих лопаток і дисків. Більш ніж 50 % всіх несправностей робочих коліс пов'язано з коливаннями. Одне з питань, яке необхідно дослідити для вирішення задачі забезпечення вібраційної надійності – це вивчення власних частот і власних форм коливань лопаток.

В якості об'єкта дослідження обрано осьовий вентилятор двоконтурного турбореактивного двигуна з периферійним діаметром на вході 2,37 м. Вентилятор має дворядні лопатки. Дослідження проводились методом чисельного моделювання. Для досягнення поставленої мети було побудовано твердотільні моделі досліджуваних лопаток: однорядна лопатка, еквівалентна дворядна лопатка, решітчасті дворядні лопатки з перегородкою на відстані 50 % висоти лопатки, 25 % та 75 %, та 25 %, 50 %, 75 %. Першим етапом дослідження було

моделювання власних коливань однорядної та еквівалентної дворядної робочої лопатки вентилятора.

Для проведення дослідження побудована розрахункова сітка з 100 тис. кінцевих елементів і 30 тис. вузлів.

За проведеними розрахунками отримано спектри власних форм коливань однорядної лопатки вентилятора.

Аналіз спектру власних форм коливань дворядної лопатки вентилятора показує, що в спектрі власних форм коливань дворядної лопатки наявні гармоніки, де відбувається пересікання лопаток першого і другого ряду, що є недопустимим і потребує уникнення. Таким чином, застосування такого лопаткового вінця є неможливим не зважаючи на те, що дворядне робоче колесо вентилятора має кращі аеродинамічні характеристики, ніж вентилятор з однорядним робочим колесом.

Наступним етапом дослідження було моделювання власних коливань решітчастих дворядних робочих лопаток. На рис. 6 показана побудована сітка для досліджуваних решітчастих дворядних лопаток.

За результати розрахунків отримано спектри власних форм коливань решітчастих дворядних лопаток вентилятора. На рис. 7 показано спектр власних форм коливань для решітчастої дворядної лопатки вентилятора.

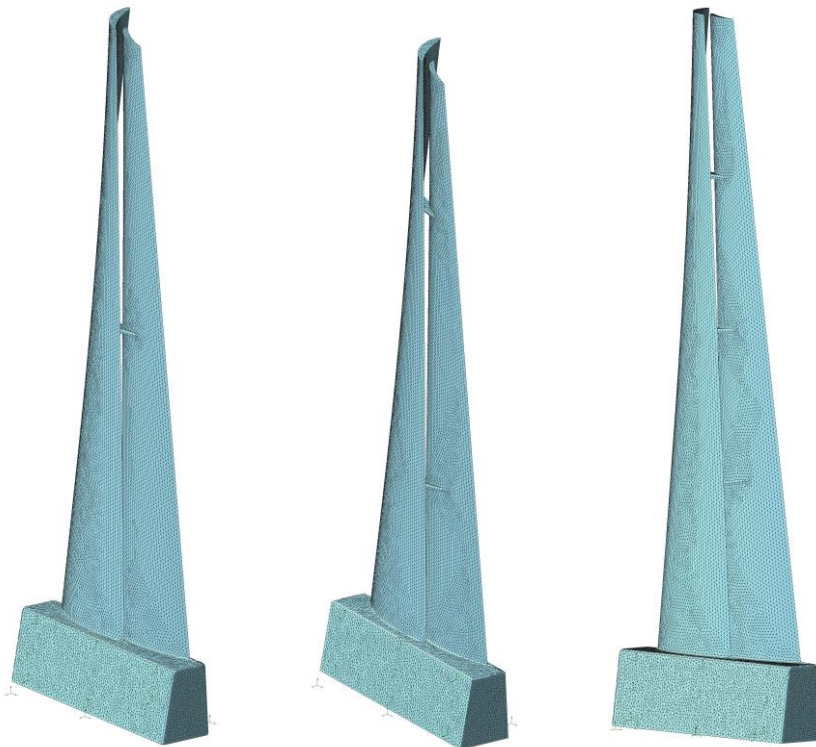
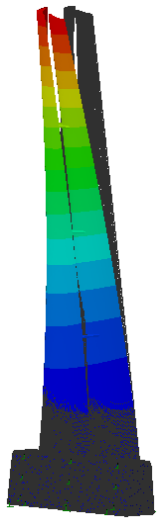
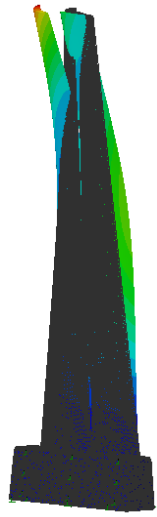


Рисунок 6. Розрахункова сітка для досліджуваних решітчастих дворядних лопаток

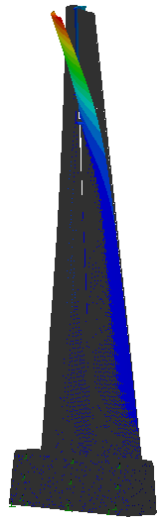
Аналіз спектрів власних форм коливань решітчастих дворядних лопаток показує, що при застосуванні трьох перетинків у решітчастому дворядному РК досягається відсутність перетинання лопаток першого і другого ряду до 15 гармонік.



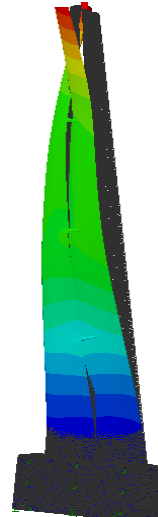
1 гармоніка



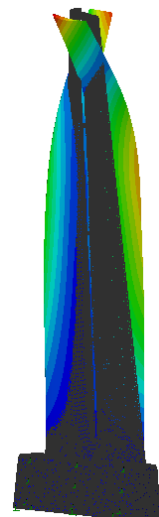
2 гармоніка



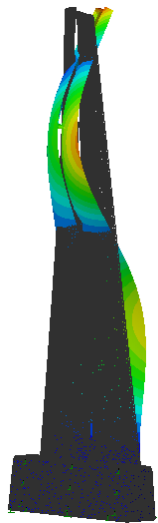
3 гармоніка



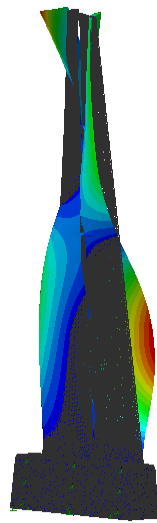
4 гармоніка



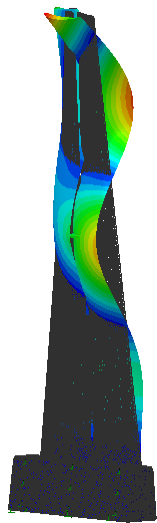
5 гармоніка



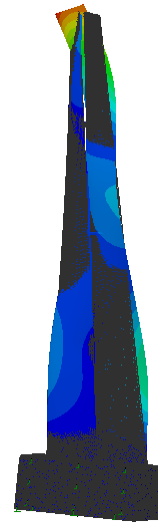
6 гармоніка



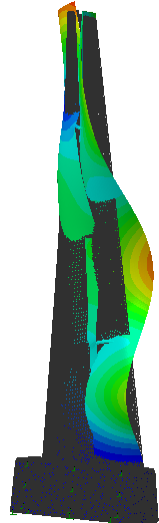
7 гармоніка



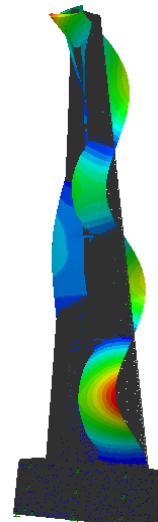
8 гармоніка



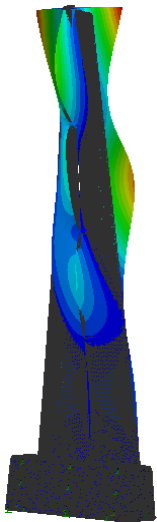
9 гармоніка



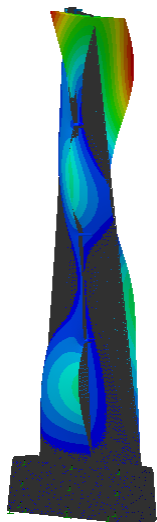
10 гармоніка



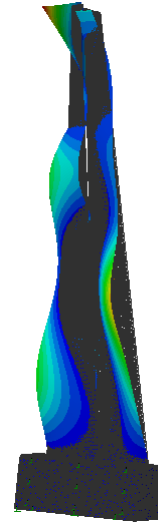
11 гармоніка



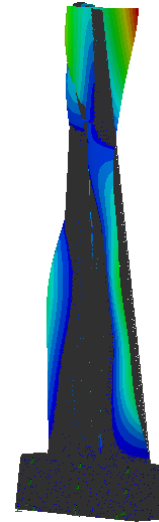
12 гармоніка



13 гармоніка



14 гармоніка



15 гармоніка

Рисунок 7. Спектр власних форм коливань решітчастої дворядної лопатки вентилятора з перегородками на відносній висоті лопатки 25 %, 50 %, 75 %

При застосуванні перегородок характер коливань та місце вузлових ліній суттєво змінюється, починаючи вже з другої форми власних коливань. Це мож-

на пояснити тим, що при наявності перегородок дворядна лопатка виступає вже єдиною системою.

Аналіз спектру власних коливань досліджуваних лопаток показав, що частота коливань дворядної лопатки набагато зменшується в порівнянні з однорядною. Однак решітчасті дворядні лопатки мають частоту власних коливань вище, ніж дворядна лопатка без перетинок. Збільшення частоти коливань відбувається при збільшенні кількості перетинок дворядної лопатки.

За результатами проведеного моделювання було побудовано діаграми Кемпбелла (рис. 8, 9).

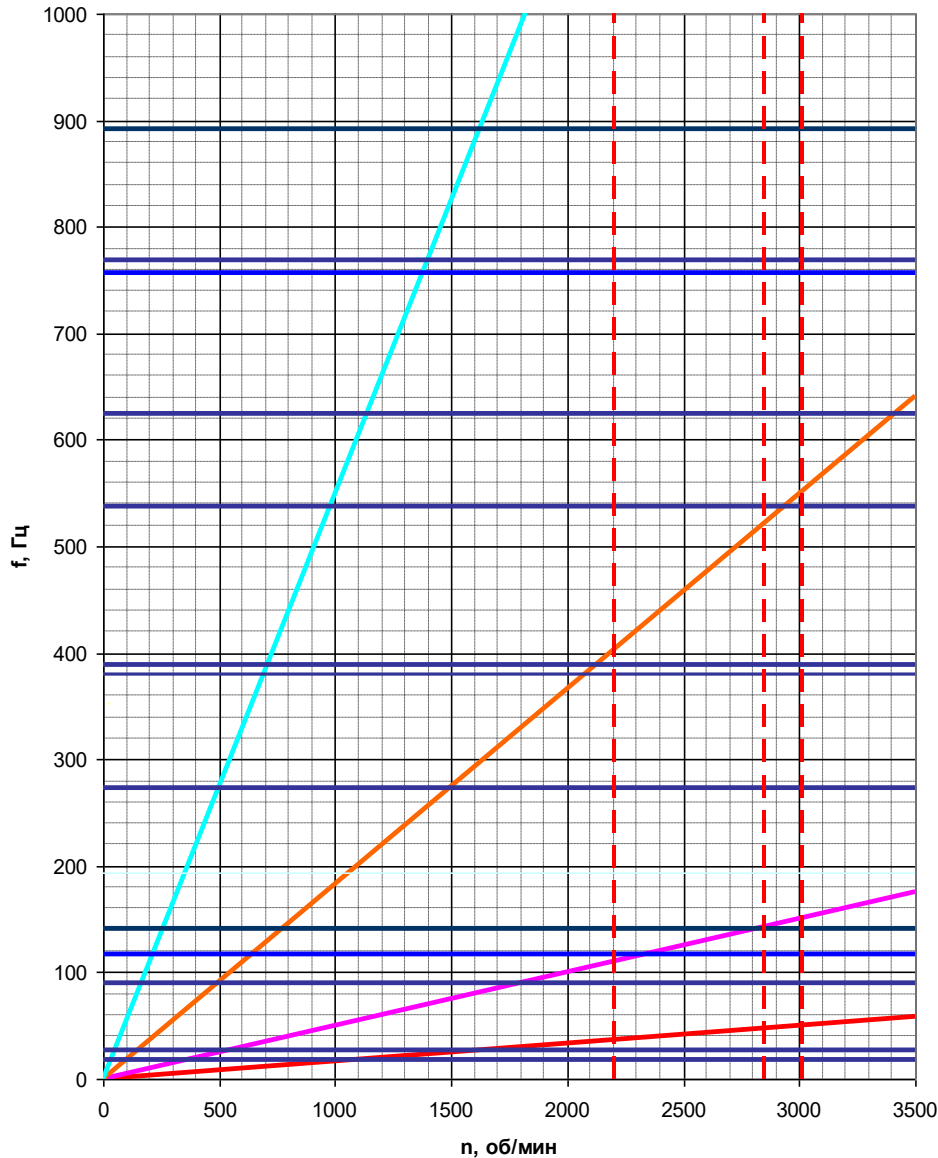


Рисунок 8. Частотна діаграма для дворядної лопатки

Резонансні для робочих лопаток режими роботи двигуна можна визначити за допомогою частотних діаграм (рис. 8, 9), які представляють собою залежність власних частот власних коливань ряду форм і частот ряду гармонік збуджуючої сили від числа обертів ротора. Лопатковий вінець має 33 лопатки, враховуючи те, що перед ним немає вхідного напрямного апарату та вхідних

стійок, були досліджені 1, 3, 11 та 33 гармоніки збуджуючої сили. Частота  $k$ -ої гармоніки збуджуючої сили в герцах розраховувалась за формулою:

$$f_k = k \cdot n_c = \frac{k \cdot n}{60},$$

Аналіз отриманих частотних діаграм показав, що для дворядної лопатки будуть виникати резонансні коливання на досліджених режимах роботи двигуна, на відміну від решітчастої дворядної лопатки.

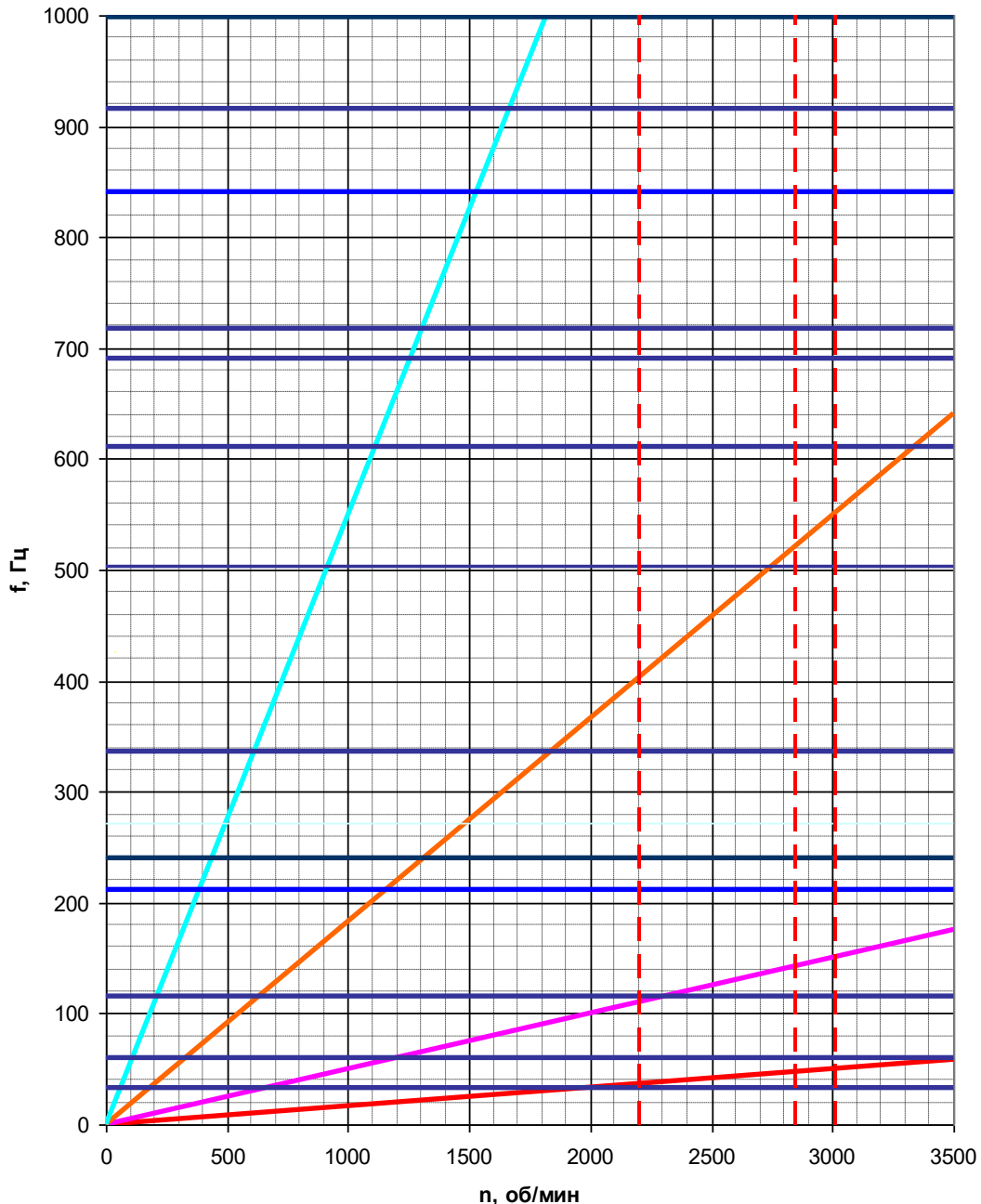


Рисунок 9. Частотна діаграма для решітчастої дворядної лопатки

На основі проведених досліджень, результати, якого представлено в 2, 3 та 4 розділі в роботі запропоновано удосконалену методику вибору параметрів решітчастого дворядного вінця робочого колеса вентилятора ТРДД (рис. 8).



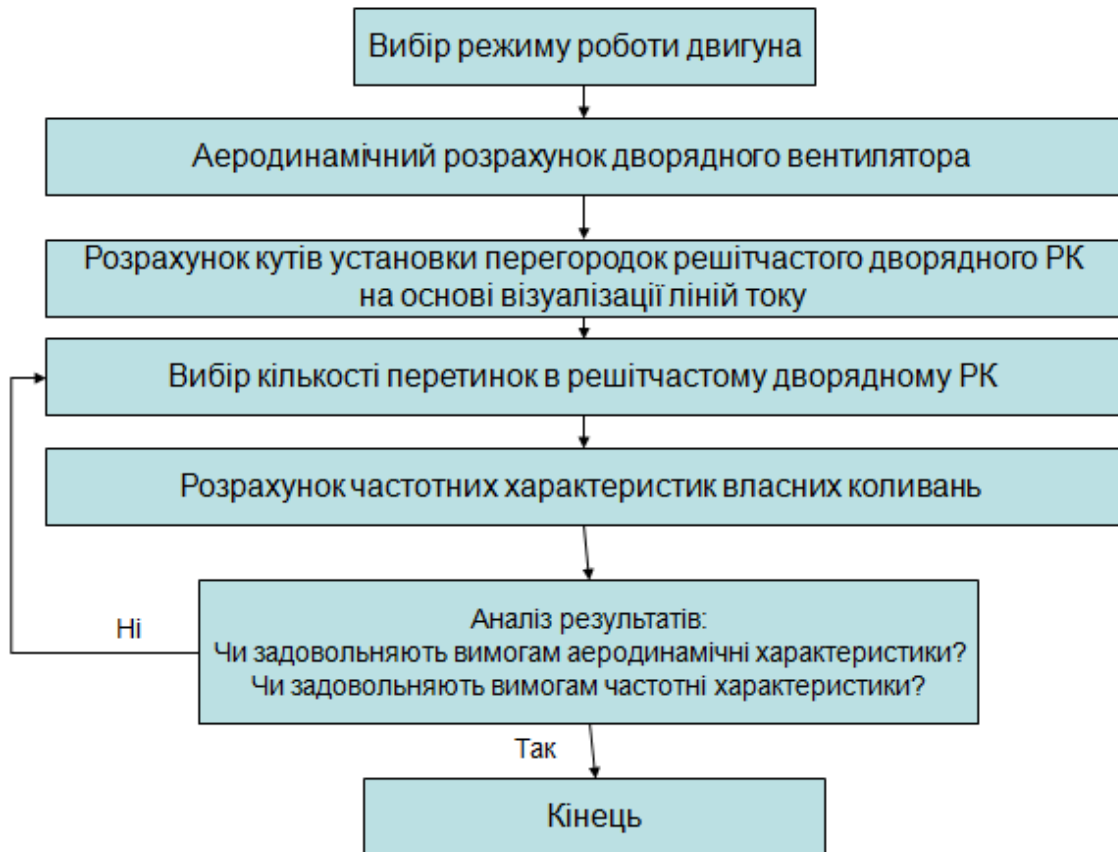


Рисунок 8. Методика вибору параметрів решітчастого дворядного лопаткового вінця робочого колеса вентилятора ТРДД

Етап 1 – Вибір режиму роботи двигуна. При виборі режиму роботи двигуна необхідно брати за основу режим, на якому необхідно забезпечити високі аеродинамічні характеристики. В загальному випадку для літаків цивільної авіації пропонується вибрати крейсерський режим роботи двигуна.

Етап 2 – Аеродинамічний розрахунок дворядного вентилятора. Під час проведення цього етапу розраховуються аеродинамічні характеристики спроектованого дворядного вентилятора. В результаті розрахунку отримують характеристики, за якими оцінюють ефективність досліджуваного вентилятора.

Етап 3 – Розрахунок кутів установки перегородок решітчастого дворядного РК на основі візуалізацій ліній току. Основою для цього етапу є результати аеродинамічний розрахунок вентилятора (етап 2). За результатами моделювання течії для крейсерського режиму роботи отримують візуалізацію ліній току в міжлопаткових каналах лопаткового вінця дворядного вентилятора, які дають змогу оцінити кут відхилення потоку і аеродинамічно вірно встановити перетинки в решітчастому дворядному РК.

Етап 4 – Вибір кількості перетинок в решітчастому РК вентилятора. Під час етапу 4 моделюється і тестується декілька варіантів кількості перетинок в решітчастому дворядному РК. Результати проведених досліджень показали, що 3 перетинки для лопатки вентилятора ТРДД зі ступенем двоконтурності 5–6 достатньо для підвищення міцнісних і аеродинамічних характеристик. Але для кожного досліджуваного варіанту РК ця кількість вибирається окремо.

Етап 5 – Розрахунок частотних характеристик власних коливань. Для варіанту решітчастого дворядного РК вентилятора, який було обрано в результаті розрахунків етапу 4, проводиться моделювання власних коливань і отримуються спектри власних коливань. На основі отриманих розрахунків будується частотна діаграма.

Етап 6 – Аналіз результатів. Під час цього етапу проводиться аналіз отриманих даних. Даються відповіді на запитання: чи задовольняють вимогам аеродинамічні характеристики вибраного варіанту решітчастого вентилятора, чи задовольняють вимогам частотні характеристики вибраного варіанту решітчастого вентилятора. У випадку якщо вибраний варіант решітчастого дворядного вентилятора задовольняє вимогам, розрахунок закінчено. У випадку якщо вибраний варіант решітчастого дворядного вентилятора не задовольняє вимогам, розрахунок повертається до етапу 4.

Удосконалена методика вибору параметрів решітчастих дворядних РК вентилятора ТРДД дозволяє врахувати аеродинамічні та частотні характеристики власних коливань решітчастих дворядних лопаток вентилятора ТРДД.

## ВИСНОВКИ

В роботі вирішено науково-прикладне завдання – підвищення ефективності робочих коліс вентиляторів двоконтурних турбореактивних двигунів шляхом застосування решітчастих дворядних робочих коліс.

1. Аналіз літературних джерел показав, що застосування дворядних лопаткових вінців дозволяє покращити ефективність вентиляторів та компресорів: збільшити напірність, зменшити вагу та габарити, покращити акустичні характеристики. Однак при застосуванні їх у лопаткових вінцях вентиляторів ТРДД з великим ступенем двоконтурності виникає проблема забезпечення достатнього рівня надійності. Один із шляхів вирішення цієї проблеми є застосування решітчастих дворядних лопаткових вінців.

2. На основі проведення тестових задач для дворядної решітки аеродинамічних профілів та ступеня осьового компресора вибрано і обґрунтовано модель турбулентної в'язкості SST для моделювання течії в дворядних лопаткових вінцях вентилятора.

3. В результаті моделювання течії у вентиляторі ТРДД з дворядним робочим колесом показано, що ступінь підвищення тиску у вентиляторі з дворядним РК зростає від 0,32 до 20 % для режимів роботи при частоті обертання  $n = 2202$  об/хв,  $n = 2848$  об/хв, та  $n = 3010$  об/хв в діапазоні значень газодинамічної функції витрати  $q(\lambda)=0,4\dots 1$ .

4. Проведено дослідження аеродинамічних характеристик решітчастих дворядних РК вентилятора ТРДД. Показано, що застосування решітчастих дворядних РК забезпечує підвищення ефективності вентилятора, збільшує його напірність. Ступінь підвищення тиску в діапазоні режимів обертання ротору від 2202...3010 об/хв. збільшується до 10 % в порівнянні з дворядним РК.

5. Досліджено частотні характеристики власних коливань однорядних та решітчастих дворядних лопаток робочих коліс вентилятора ТРДД.

Показано, що застосування дворядних лопаток у дослідженому вентиляторі без перегородок недопустимо у зв'язку з наявністю власних форм коливань, де відбувається перетинання лопаток першого і другого ряду.

Отримані результати показують, що застосування решітчастих дворядних робочих лопаток дозволяє покращити жорсткість та забезпечити надійну роботу вентилятора.

6. Удосконалена методика вибору параметрів решітчастих дворядних РК вентилятора ТРДД дозволяє врахувати аеродинамічні та частотні характеристики власних коливань решітчастих дворядних лопаток вентилятора ТРДД.

7. В роботі отримала подальший розвиток теорія дворядних лопаткових вінців в частині дослідження решітчастих дворядних лопаткових вінців з великим подовженням.

## СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

*Наукові праці, в яких опубліковані основні наукові результати дисертації*

1. Astanin, V.V., Borodachov, M.M., Bogdan, S.Y., Balalaeiv, A.V., Bernal, F.P.F. Limit State of a Composite Three-Layered Cylindrical Shell under Internal Pressure, *Strength of Materials*, 2015, 47(4), p. 544–552 (SCOPUS).

2. Балалаєв А. В., Дорошенко К. В. Чисельне дослідження власних коливань дворядної робочої лопатки ступеня осьового компресора. *Проблеми тертя та зношування*, 2020, 3 (88). – С. 109–116.

3. Балалаєв А. В., Дорошенко К. В., Терещенко Ю.М. Моделювання власних коливань дворядної робочої лопатки вентилятора. *Проблеми тертя та зношування*, 2020, 4 (88). – С. 75–82.

4. Balalaeiv A. Flow simulation in an elementary tandem vane row of compressor. *Annali d'Italia*. 2020. № 10-1. – P. 51–54

5. Балалаєв А. В., Дорошенко К. В., Терещенко Ю. М. Оцінка впливу кута стрілоподібності лопаток на аеродинамічну навантаженість вентилятора двоконтурного турбореактивного двигуна. *German International Journal of Modern Science* № 3, 2020. – С. 38–41.

*Наукові праці, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації*

6. Astanin V., Shevchenko O., Balalaeiv A., Bondar N. Influence of production technology of fiberglass on the strength characteristics. The Eighth World Congress “Aviation in the XXI-st century”, 2018, Kyiv, p. 1.3.9–1.3.13.

7. Balalaeiv A. V. Application of composites in elements of fans and compressors of aircraft engines. The 12th International scientific and practical conference “Topical issues of the development of modern science”, July 29–31, 2020, Publishing House “ACCENT”, Sofia, Bulgaria. 2020. – P. 25–28.

8. Balalaeiv A., Doroshenko K. V. Test problem of the flow modeling in axial compressor stage. The Ninth World Congress “Aviation in the XXI-st century”, 2020, Kyiv, p. 1.3.9–1.3.13.

9. Хижняк М. В., Балалаєв А. В. Пасивне управління примежовим шаром на лопатках вентилятора газотурбінного двигуна. XXV Міжнародний Конгрес

двигунобудівників: Тези доповідей. – Харків : Нац. аерокосмічний ун-т «Харк. авіац. ін-т», 2020, С. 53.

10. Балалаєв А. В. Вплив кута стріловидності на аеродинамічну навантаженість вентилятора газотурбінного двигуна. Інноваційні технології: матеріали наук.-техн. конф. студентів, аспірантів, докторантів та молодих учених ІНТЛ НАУ (м. Київ, 25–26 листоп. 2020 р.). Київ, 2020. – С. 68–69.

11. Балалаєв А. В., Дорошенко К. В. Ефект стріловидності лопаток в дозвукових компресорах і вентиляторах газотурбінних двигунів. XXI Міжнародна науково-технічна конференція АС ПГП Промислова гідравліка і пневматика, м. Київ, Україна, 2020 р. – С. 21–22.

*Наукові праці, які додатково відображають наукові результати дисертації*

12. Astanin V. V., Olefir G. O., Balalaev A. V. Experimental complex for material impact strength researches. Journal of KONES. Powertrain and Transport. Warsaw: European Science Society of Powertrain and Transport Publication. 2008. V. 15, № 1. – С. 17–28.

13. Astanin V. V., Olefir G. O., Balalaiev A. V. Experimental complex for material impact strength researches. Programy MES we wspomaganiu analizu, projektowania i wytwarzania. Kazimierz Dolny. 2007. – P. 13–14.

## АНОТАЦІЯ

**Балалаєв А. В. Характеристики решітчастого дворядного робочого колеса вентилятора двоконтурного турбореактивного двигуна.** – Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук зі спеціальності 05.05.03 – двигуни та енергетичні установки. – Національний авіаційний університет МОН України; Національний авіаційний університет МОН України; Київ, 2021.

Дисертаційну роботу присвячено вирішенню науково-прикладної задачі підвищення ефективності дворядних лопаткових вінців вентиляторів двоконтурних турбореактивних двигунів шляхом застосування решітчастих дворядних робочих коліс.

Вперше отримано характеристики решітчастого дворядного робочого колеса вентилятора ТРДД методом чисельного експерименту.

Показано, що застосування решітчастих дворядних РК забезпечує підвищення ефективності вентилятора, збільшує його напірність. Ступінь підвищення тиску в діапазоні режимів обертання ротору від 2202...3010 об/хв збільшується до 10 % в порівнянні з дворядним РК.

Представлено дослідження частотних характеристик власних коливань однорядної, еквівалентної дворядної та решітчастих дворядних лопаток робочих коліс вентилятора ТРДД. Показано, що застосування дворядних лопаток у дослідженому вентиляторі без перегородок недопустимо у зв'язку з наявністю власних форм коливань, де відбувається перетинання лопаток першого і другого ряду. Показано, що застосування решітчастих дворядних робочих лопаток дозволяє покращити жорсткість та забезпечити надійну роботу вентилятора.

Удосконалено методику вибору параметрів решітчастого дворядного робочого колеса вентилятора ТРДД з урахуванням спектру частот власних коливань.

Отримала подальший розвиток теорія дворядних лопаткових вінців в частині дослідження решітчастих дворядних лопаткових вінців з великим подовженням.

**Ключові слова:** решітчасте робоче колесо, ефективність, вентилятор, дворядне робоче колесо, турбореактивний двоконтурний двигун, аеродинамічні характеристики, методика, ступінь підвищення тиску, власні коливання, чисельний експеримент.

## АННОТАЦІЯ

**Балалаев А. В. Характеристики решетчатого двухрядного рабочего колеса вентилятора двухконтурного турбореактивного двигателя.** – Рукопись.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.05.03 - двигатели и энергетические установки. – Национальный авиационный университет МОН Украины, Киев, 2021.

Диссертационная работа посвящена решению научно-прикладной задачи повышения эффективности двухрядных лопаточных венцов вентиляторов двухконтурных турбореактивных двигателей путем применения решетчатых двухрядных рабочих колес.

Проведена серия тестовых задач для двухрядной решетки аэродинамических профилей и ступени осевого компрессора с целью выбора и обоснования модели турбулентной вязкости.

Впервые получены характеристики решетчатого двухрядного рабочего колеса (РК) вентилятора ТРДД методом численного эксперимента.

Исследованы аэродинамические характеристики решетчатых двухрядных РК вентилятора. Созданы твердотельные модели решетчатых двухрядных РК с учетом линий тока течения в межлопаточном канале. Показано, что применение решетчатых двухрядных РК обеспечивает повышение эффективности вентилятора, увеличивает его напорность. Степень повышения давления в диапазоне режимов вращения ротора от 2202 ... 3010 об/мин увеличивается до 10 % по сравнению с двухрядным РК.

Представлены исследования частотных характеристик собственных колебаний однорядной, эквивалентной двухрядной и решетчатых двухрядных лопаток рабочих колес вентилятора ТРДД. Показано, что применение двухрядных лопаток в исследованном вентиляторе без перегородок недопустимо в связи с наличием собственных форм колебаний, где происходит пересечение лопаток первого и второго ряда. Показано, что использование решетчатых двухрядных рабочих лопаток позволяет улучшить жесткость и обеспечить надежную работу вентилятора.

Усовершенствована методика выбора параметров решетчатого двухрядного РК вентилятора ТРДД с учетом спектра частот собственных колебаний. Усовершенствованная методика состоит из следующих этапов: выбор режима работы двигателя, аэродинамический расчет двухрядного вентилятора, расчет углов установки перегородок решетчатого двухрядного РК на основе визуализации.

заций линий тока, выбор количества перегородок в решетчатом РК вентилятора, расчет частотных характеристик собственных колебаний и анализ результатов.

Получила дальнейшее развитие теория двухрядных лопаточных венцов в части исследования решетчатых двухрядных лопаточных венцов с большим удлинением.

**Ключевые слова:** решетчатое рабочее колесо, эффективность, вентилятор, двухрядное рабочее колесо, турбореактивный двухконтурный двигатель, аэродинамические характеристики, методика, степень повышения давления, собственные колебания, численный эксперимент.

## SUMMARY

**Balalaiev A. V. Characteristics of a tandem grid fan impeller of a turbofan engine.** – Manuscript.

Thesis for Degree of Candidate of Engineering Science, specialty 05.05.03 – Engines and Energy Installations. – National Aviation University of the Ministry of Education and Science of Ukraine, Kiev, 2021.

The thesis is devoted to solving the scientific and applied problem of increasing the efficiency of tandem blade rows of fans of turbofan engines by using grid tandem impellers.

For the first time, the characteristics of a grid tandem impeller are obtained by the method of numerical experiment.

It is shown that the use of grid tandem impellers provides an increase in the efficiency of the fan, increases its loading. The pressure ratio increases in the range of rotor rotation speed from 2202 ... 3010 rpm increases up to 10 % compared to a tandem impellers.

Investigations of the frequency characteristics of natural vibrations of a single-row, equivalent to tandem row and grid tandem blades of the turbofan engine fan impellers are presented. It is shown that the use of tandem blades in the investigated fan without partitions is unacceptable due to the presence of natural vibration modes, in which the blades of the first and second rows intersect. It is shown that the use of grid tandem rotor blades improves rigidity and ensures reliable operation of the fan.

The technique for selecting the parameters of a grid tandem turbofan engine fan impeller has been improved, taking into account the spectrum of natural vibration frequencies.

The theory of tandem blade rows was further developed in terms of the study of grid tandem blade rows with a large elongation.

**Key words:** grid impeller, efficiency, fan, tandem impeller, turbofan engine, aerodynamic characteristics, technique, pressure ratio, natural vibrations, numerical experiment.