

УДК 629.735.03

DOI: 10.18372/0370-2197.4(89).15012

А. В. БАЛАЛАЄВ, К. В. ДОРОШЕНКО, Ю. М. ТЕРЕЩЕНКО

Національний авіаційний університет, Київ

МОДЕЛЮВАННЯ ВЛАСНИХ КОЛИВАНЬ ДВОРЯДНОЇ РОБОЧОЇ ЛОПАТКИ ВЕНТИЛЯТОРА

Застосування дворядної конструкції лопаткових вінців в осьових вентиляторах і компресорах авіаційних двигунів дозволяє збільшити ступінь підвищення тиску. Цей ефект заснований на збільшенні кута повороту потоку в міжлопатковому каналі і пасивного управління прикордонним шаром. Дослідження, спрямовані на вивчення характеристик дворядних лопаткових вінців є актуальними. Однак особливої уваги потребує вивчення питань забезпечення міцності і надійності дворядних робочих коліс. Одним із можливих методів забезпечення жорсткості є застосування полок (перегородок) між лопатками першого і другого ряду, особливо для лопаток з великим подовженням. Метою роботи є оцінка спектра форм власних коливань дворядного робочого колеса осьового вентилятора з перегородками між лопаткою першого і другого ряду. В якості об'єкта дослідження обрано осьовий вентилятор двоконтурного турбореактивного двигуна з дворядними лопатками. Дослідження проводились методом чисельного моделювання. Для досягнення поставленої мети було побудовано твердотільні моделі досліджуваних лопаток: дворядна лопатка без перегородок, дворядна лопатка з однією перегородкою на відстані 50% висоти лопатки та дворядна лопатка з двома перегородками на відстані 50% та 75%. Для отримання спектру власних частот коливань було побудована розрахункова сітка досліджуваних дворядних лопаток, яка мала приблизно 28 тис. вузлів (95 тис. елементів). Отримані результати показали, що наявність перегородок в дворядній лопатці робочого колеса сприяє підвищенню значення частоти власних коливань, починаючи з першої форми. Аналіз візуалізації спектру власних форм коливань досліджуваних дворядних лопаток показує, що при застосуванні перегородок характер коливань та місце вузлових ліній суттєво змінюється, починаючи вже з другої форми власних коливань. Це можна пояснити тим, що при наявності перегородок дворядна лопатка виступає вже єдиною системою. Поряд тим, що жорсткість дворядних лопаток з перегородками підвищується, дворядні лопатки теж мають форми, де є пересікання лопатки першого і другого ряду. В подальшому планується отримати частотні діаграми для дворядних лопаток вентилятора.

Ключові слова: вентилятор, власні коливання, власні форми коливань, робоче колесо, дворядна лопатка, перегородки, жорсткість

Вступ. Підвищення напірності осьових компресорів і вентиляторів є одним з важливих питань сучасного авіаційного двигунобудування. Застосування дворядної конструкції лопаткових вінців, зокрема робочих коліс, дозволяє підвищити ступінь підвищення тиску [1-6]. Цей ефект заснований на збільшенні кута повороту потоку в міжлопатковому каналі і пасивного управління прикордонним шаром.

Результати багатьох авторів підтверджують ефективність застосування дворядних робочих коліс. В роботі [2] представлені результати оптимізації трансзвукового дворядного робочого колеса (на периферійному діаметрі число Маха $M = 1,2$) з урахуванням деяких факторів міцності. Автори враховували в процесі оптимізації відносну довжину лопатки, кривизну профілю, співвідношення хор-

ди профілю у втулки і на периферії. В результаті оптимізації дослідникам вдалося знизити втрати повного тиску на 20%.

В роботі [3] наводяться результати дослідження аеродинамічних характеристик дворядної лопатки компресора з базовим профілем С4 за допомогою чисельного експерименту. Досліджується кілька варіантів геометрії розташування другого ряду лопаток. Показано, що геометричні параметри щілинного каналу мають важливе значення для забезпечення збільшення ступеня підвищення тиску. Однак, авторами не розглядаються питання міцності дворядних лопаткових вінців.

В роботі [4] представлені результати дослідження, присвячені спільному використанню активного і пасивного методу управління прикордонним шаром. Автори досліджують дворядний лопатковий вінець з вдювом додаткової маси повітря. Отримані результати показують, що комбінація методів дає прекрасний результат і лопатковий вінець має високі аеродинамічні характеристики. Однак, варто відзначити, що автори не розкрили питання складності застосування комбінації таких методів управління прикордонним шаром і також не торкнулися питання міцності досліджуваного лопаточного вінця.

В роботі [5] досліджуються можливості аеродинамічного удосконалення проточної частини Rotor 37 за допомогою використання дворядного робочого колеса. Авторам вдалося підвищити запас газодинамічної стійкості, розширити діапазон режимів роботи і збільшити ступінь підвищення тиску в порівнянні з вихідним однорядним робочим колесом.

Літературний огляд показує, що дослідження, спрямовані на вивчення характеристик дворядних лопаткових вінців є актуальними. Однак особливої уваги потребує вивчення питань забезпечення міцності і надійності дворядних робочих коліс. В роботі [6] було отримано дані щодо спектру власних частот коливань однорядної і еквівалентної дворядної лопаток робочого колеса, встановлено, що вони суттєво відрізняється. Також було показано, що існують власні форми коливань дворядної лопатки робочого колеса, де відбувається пересікання лопаток першого і другого ряду, і в подальшому до руйнування лопатки. Одним із можливих методів забезпечення жорсткості є застосування полок (перегородок) між лопатками першого і другого ряду, особливо для лопаток з великим подовженням.

Постановка завдання. Метою роботи є оцінка спектра форм власних коливань дворядного робочого колеса осьового вентилятора з перегородками між лопаткою першого і другого ряду.

Результати досліджень та їх обговорення. 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 (рис.1.): дворядна лопатка без перегородок, дворядна лопатка з однією перегородкою на відстані 50% висоти лопатки та дворядна лопатка з двома перегородками на відстані 50% та 75%.

Для отримання спектру власних частот коливань було побудовано розрахункова сітка досліджуваних дворядних лопаток, яка мала приблизно 28 тис. вузлів (95 тис. елементів). Отримані результати зведено в таблицю 1.

Аналіз спектру власних частот коливань показує, що лопатка робочого колеса без перегородок має менші значення частоти коливань, ніж дворядна лопа-

тка з однією перегородкою. Наявність двох перегородок збільшує частоту коливань, починаючи з першої форми коливань.

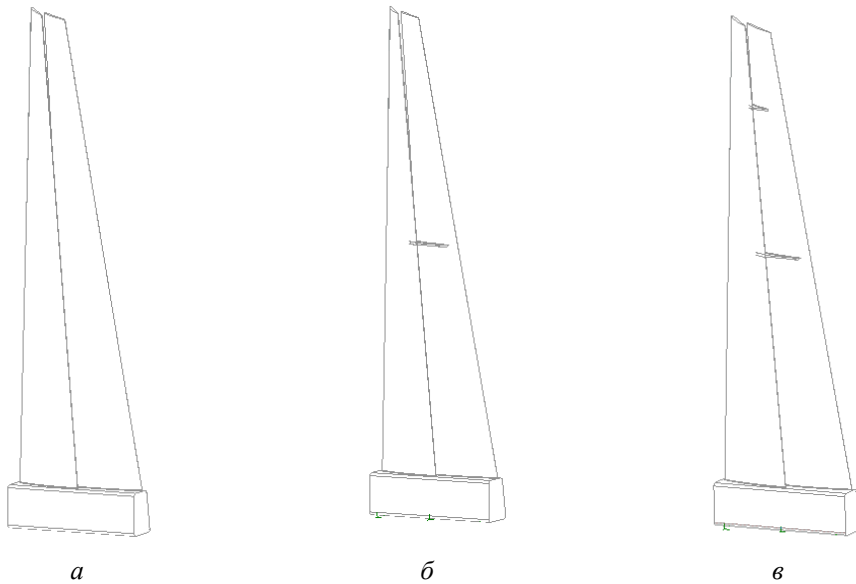


Рис. 1. Твердотільні моделі досліджуваних дворядних лопаток: *a* – без перегородок, *б* – з однією перегородкою та *в* – двома перегородками.

Таблиця 1

Спектри власних частот коливань досліджуваних дворядних лопаток

№	Частота коливань дворядної лопатки вентилятора без перегородок, Гц	Частота коливань дворядної лопатки вентилятора з перегородкою на відстані 50% висоти лопатки, Гц	Частота коливань дворядної лопатки вентилятора з перегородками на відстані 50% та 75% висоти лопатки, Гц
1	15,3	23,1	24,8
2	15,9	41,3	91,4
3	70	72,7	121,5
4	71,7	168	187,6
5	158,7	188,7	214,8
6	165	213,7	239,6
7	194	233	296
8	204,5	340,5	395,8
9	275	364	528,7
10	300	404	641,9
11	379	465	664,8
12	400	588,8	723
13	614	633,5	789,4
14	641,6	660,3	818
15	644	716	830

Візуалізація спектру власних згинальних та крутильних форм коливань досліджуваних дворядних лопатки вентилятора показано на рис. 2 – 4.

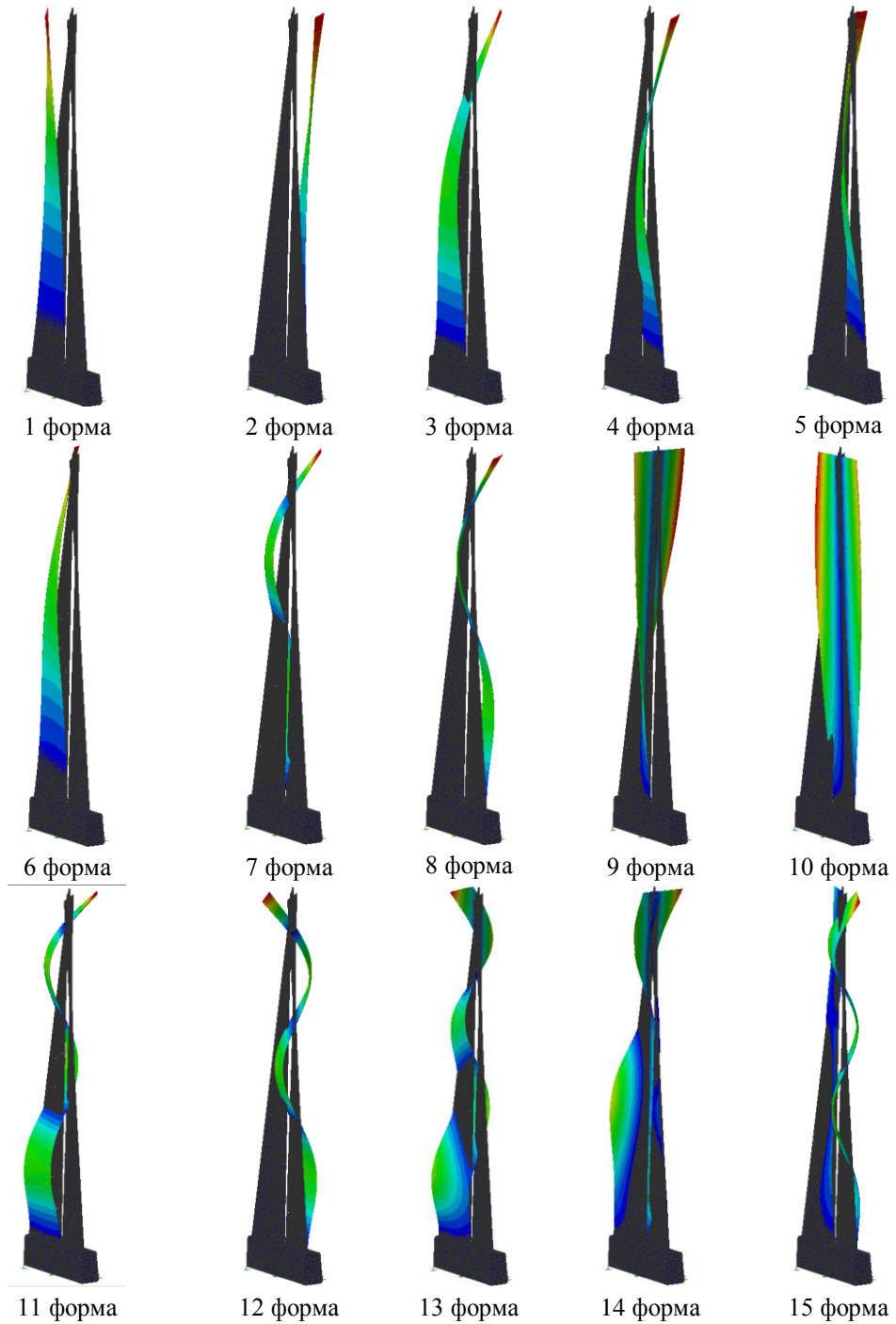


Рис. 2. Спектр власних форм коливань дворядної лопатки вентилятора без перегородок

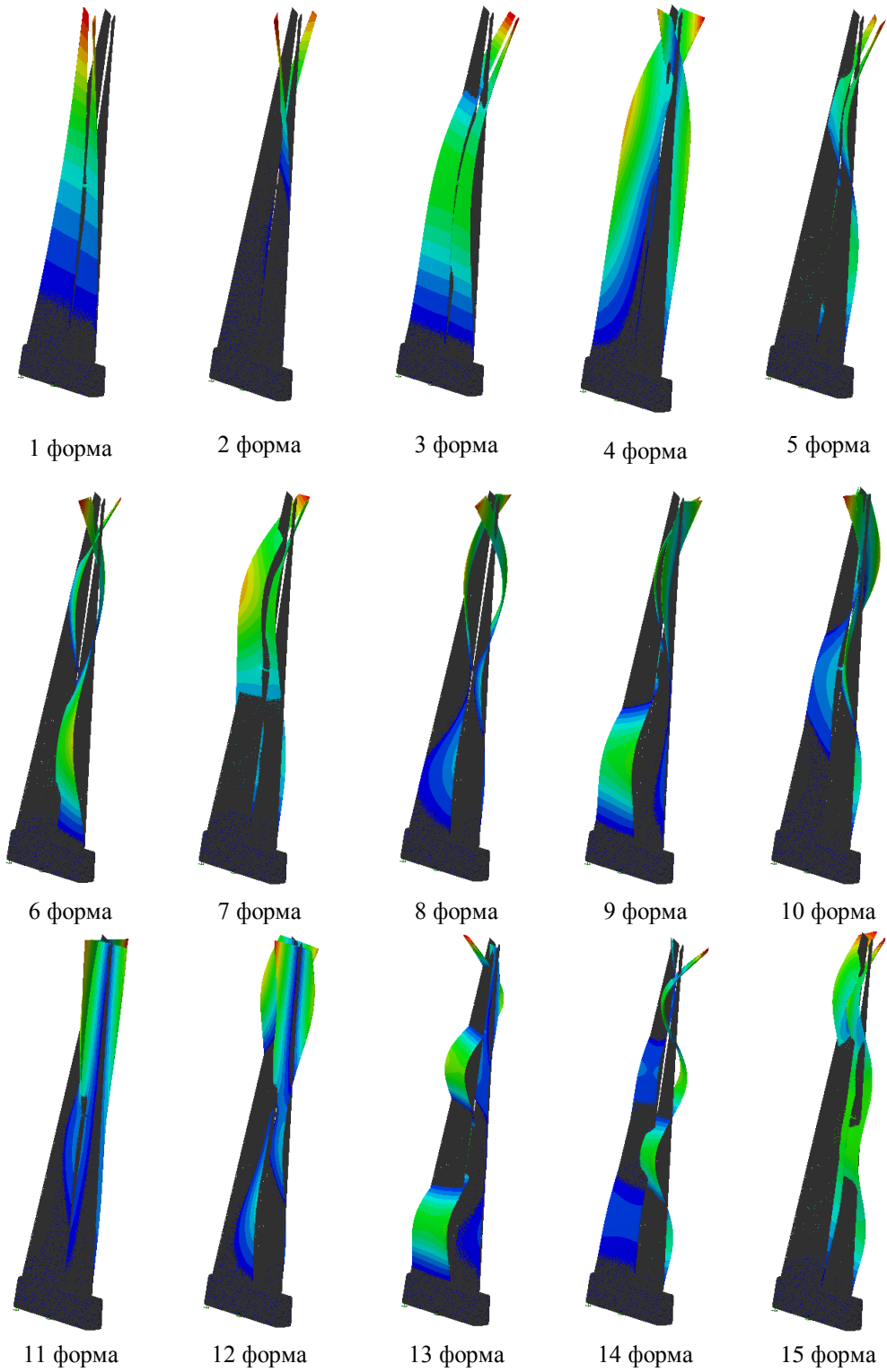


Рис. 3. Спектр власних форм коливань дворядної лопатки вентилятора з перегородкою на відстані 50% висоти лопатки

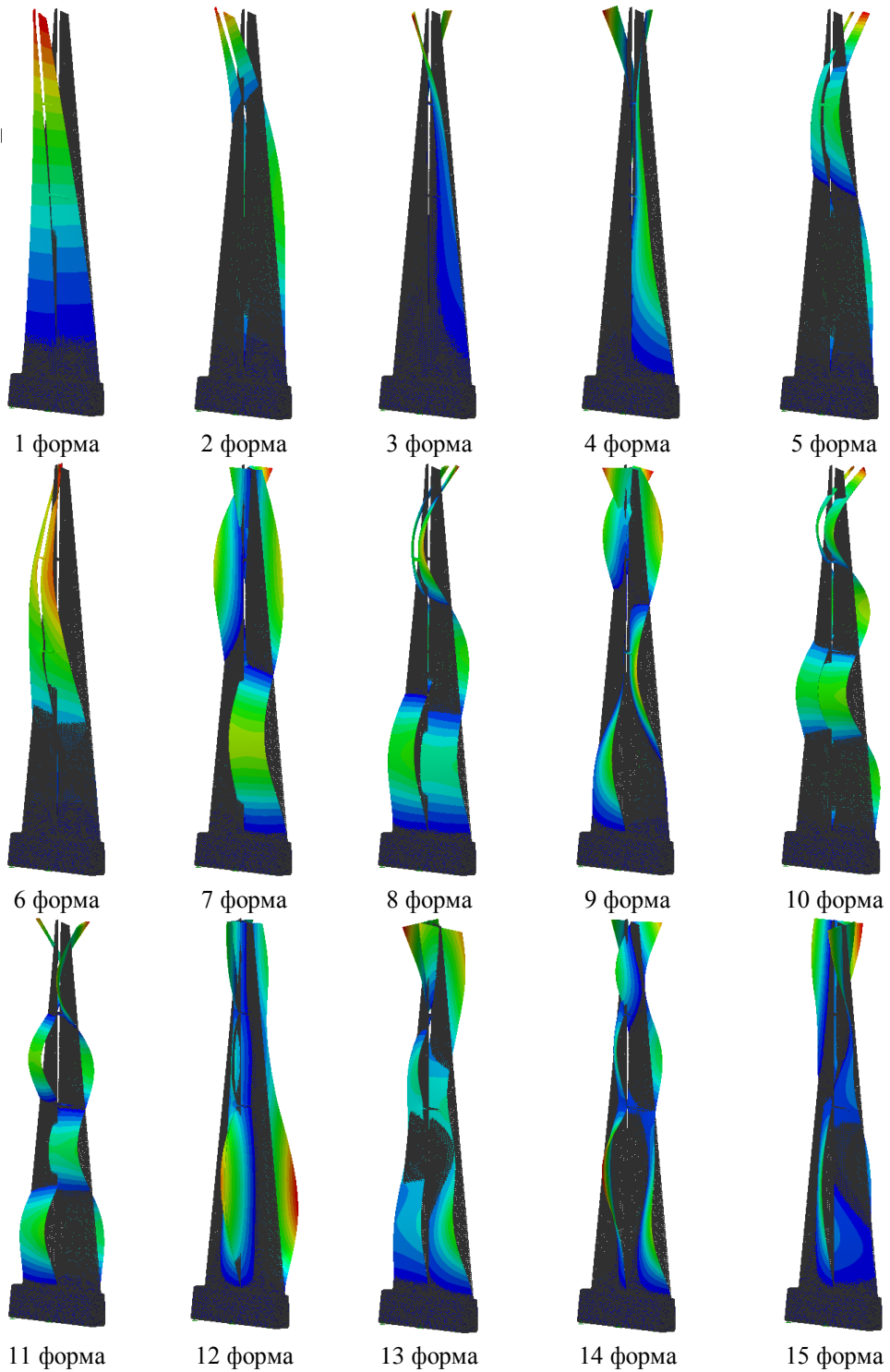


Рис. 4. Спектр власних форм коливань дворядної лопатки вентилятора з перегородками на відстані 50% і 75% висоти лопатки

Аналіз візуалізації спектру власних форм коливань досліджуваних дворядних лопаток показує, що при застосуванні перегородок характер коливань та

місце вузлових ліній суттєво змінюється, починаючи вже з другої форми власних коливань. Це можна пояснити тим, що при наявності перегородок дворядна лопатка виступає вже єдиною системою. Поряд тим, що жорсткість дворядних лопаток з перегородками підвищується, дворядні лопатки теж мають форми, де є пересікання лопатки першого і другого ряду.

Висновки. В роботі проведено оцінку спектра форм власних коливань дворядного робочого колеса осьового вентилятора з перегородками між лопаткою першого і другого ряду. Отримані результати показали, що наявність перегородок в дворядній лопатці робочого колеса сприяє підвищенню значень частоти власних коливань, починаючи з першої форми. Візуалізація спектру власних форм коливань досліджуваних дворядних лопаток показала, що при застосуванні перегородок змінюється місце вузлових ліній, починаючи вже з другої форми власних коливань. В подальшому планується отримати частотні діаграми для дворядних лопаток вентилятора.

Список літератури

1. *Терещенко Ю.М.* Аэродинамическое совершенствование лопаточных аппаратов компрессоров / Ю.М. Терещенко. – М.: Машиностроение, 1987. – 168с.
2. *Tao Yuan* Analysis of Flow Characteristic of Transonic Tandem Rotor Airfoil and Its Optimization / Yuan Tao, Yifei Wu , Xianjun Yu, Baojie Liu // *Applied Science*. – 2020. – 10. – 13 pages. doi:10.3390/app10165569
3. *Alm-Eldien A. M.* Performance Evaluation of the Tandem C4 Blades for Axial-Flow Compressors / A. M. Alm-Eldien, A. F. Abdel Gawad, G. Hafaz, M. G. Abd El Kreim // *American Journal of Aerospace Engineering. Special Issue: Hands-on Learning Technique for Multidisciplinary Engineering Education*. – 2015. – Vol. 2, No. 1. – P. 74-92. doi: 10.11648/j.ajae.s.20150201.17
4. *Zhang Longxin* A combination application of tandem blade and endwall boundary layer suction in a highly loaded aspirated compressor outlet vane / Longxin Zhang and Songtao Wang // *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part A: Journal of Power and Energy* – 2018. – Vol. 232, No. 1 – P. 129–143
5. *Pan Ruochi* Optimization Design and Analysis of Supersonic Tandem Rotor Blades / Ruochi Pan, Zhaoyun Song, Bo Liu // *Energies* – 2020. – Vol. 13, No. 3228. – P. 129–143. doi:10.3390/en13123228
6. *Балалаєв А.В.* Чисельне дослідження власних коливань дворядної робочої лопатки ступеня осьового компресора / А.В. Балалаєв, К.В. Дорошенко // *Проблеми тертя та зношування* – 2020. – № 3(88). – P. 109–116. doi: 10.18372/0370-2197.3(88).14924

Стаття надійшла до редакції 26.11.2020.

Балалаєв Антон Валерійович – асистент кафедри механіки Національного авіаційного університету, avbalalaev@ukr.net.

Дорошенко Катерина Вікторівна – д-р. техн. наук, доцент, професор кафедри авіаційних двигунів Національного авіаційного університету, kiki_ua@ukr.net.

Терещенко Юрій Матвійович – д-р. техн. наук, професор, завідувач кафедри авіаційних двигунів Національного авіаційного університету, terj@nau.edu.ua.

A. V. BALALAEV, K. V. DOROSHENKO, Yu. M. TERESHCHENKO

NATURAL VIBRATION MODELING OF TANDEM ROTOR BLADE OF AXIAL FAN

The use of a tandem design of blade rows in axial fans and compressors of aircraft engines allows increasing the pressure ratio. This effect is based on an increase in the angle of flow rotation in the inter channel and passive control of the boundary layer. Research aimed at studying the characteristics of tandem blade rows is relevant. However, special attention is required to study the issues of ensuring the strength and reliability of tandem impellers. One of the possible methods of ensuring rigidity is the use of shelves between the blades of the first and second rows, especially for blades with a large elongation. The aim of the work is to assess the spectrum of natural vibration modes of a tandem axial fan impeller with shelves between the blades of the first and second rows. An axial fan of a by-pass turbojet engine with tandem blades was chosen as the object of research. The research was carried out by the method of numerical simulation. To achieve this goal, solid models of the studied blades were built: a tandem blade without baffles, a tandem blade with one shelf at a distance of 50% of the blade height, and a tandem blade with two shelves at a distance of 50% and 75%. To obtain a spectrum of natural frequencies of vibrations, a computational grid of the investigated tandem blades was built, which had approximately 28 thousand nodes (95 thousand elements). The results obtained showed that the presence of shelves in a tandem impeller blade contributes to an increase in the value of the natural vibration frequency, starting from the first form. Analysis of the visualization of the spectrum of natural vibration modes of the investigated tandem blades shows that when using shelves, the nature of the vibrations and the location of the nodal lines changes significantly, starting from the second form of natural vibrations. This can be explained by the fact that in the presence of shelves, the tandem blade is already a single system. Along with the fact that the rigidity of tandem blades with shelves increases, tandem blades have shapes where there are intersections of the blades of the first and second rows. In the future, it is planned to obtain frequency diagrams for tandem fan blades.

Key words: fan, natural vibrations, natural vibration modes, impeller, tandem blade, shelf, stiffness.

References

1. Tereshchenko Yu.M. Aerodynamic improvement of compressor blades / Yu.M. Tereshchenko. – M.: Mechanical engineering, 1987. – 168p.
2. Tao Yuan Analysis of Flow Characteristic of Transonic Tandem Rotor Airfoil and Its Optimization / Yuan Tao, Yifei Wu, Xianjun Yu, Baojie Liu // Applied Science. – 2020. – 10. – 13 pages. doi:10.3390/app10165569.
3. Alm-Eldien A. M. Performance Evaluation of the Tandem C4 Blades for Axial-Flow Compressors / A. M. Alm-Eldien, A. F. Abdel Gawad, G. Hafaz, M. G. Abd El Kreim // American Journal of Aerospace Engineering. Special Issue: Hands-on Learning Technique for Multidisciplinary Engineering Education. – 2015. – Vol. 2, No. 1. – P. 74-92. doi: 10.11648/j.ajae.s.20150201.17.
4. Zhang Longxin A combination application of tandem blade and endwall boundary layer suction in a highly loaded aspirated compressor outlet vane / Longxin Zhang and Songtao Wang // Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part A: Journal of Power and Energy – 2018. – Vol. 232, No. 1 – P. 129–143
5. Pan Ruochi Optimization Design and Analysis of Supersonic Tandem Rotor Blades / Ruochi Pan, Zhaoyun Song, Bo Liu // Energies – 2020. – Vol. 13, No. 3228. – P. 129–143. doi:10.3390/en13123228.
6. Balalaiev A. V. Numerical research of natural vibrations of tandem rotor blade of axial compressor stage / A.V. Balalaiev, K.V. Doroshenko // Problems of friction and wear – 2020. – № 3(88). – P. 109–116. doi: 10.18372/0370-2197.3(88).14924.