

В. В. ДОНЧЕНКО, В. І. ГНЕСІН, Л. В. КОЛОДЯЖНА, І. Ф. КРАВЧЕНКО, О. В. ПЕТРОВ

ПРОГНОЗУВАННЯ ФЛАТЕРА ЛОПАТКОВОГО ВІНЦЯ ВЕНТИЛЯТОРА АВІАЦІЙНОГО ДВИГУНА

На підставі аналізу сучасного стану проблеми аеропружності турбомашин і існуючих методів прогнозування флатера можна зробити висновок, що найбільш перспективним підходом у дослідженні аеропружної поведінки лопаткового вінця турбомашини є підхід, заснований на тривимірній моделі нестационарної аеродинаміки та модальному аналізу руху лопатки (метод вирішення зв'язаної аеропружної задачі). Цей метод рішення зв'язаної задачі нестационарної аеродинаміки та пружних коливань лопаток дозволяє прогнозувати амплітудно-частотний спектр коливань лопаток в тривимірному потоці газу, включаючи вимушені коливання, самозбудні коливання з метою підвищення надійності лопаткових апаратів турбомашин.

Ключові слова: зв'язана задача, метод прогнозування флатера, нестационарне навантаження, власна форма, тривимірна модель течії.

V. V. DONCHENKO, V. I. GNESIN, L. V. KOLODYAZHNAYA, I. F. KRAVCHENKO, A. V. PETROV
**ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ФЛАТТЕРА ЛОПАТОЧНОГО ВЕНЦА ВЕНТИЛЯТОРА
АВИАЦИОННОГО ДВИГАТЕЛЯ**

На основании анализа современного состояния проблемы аэроупругости турбомашин и существующих методов прогнозирования флаттера можно заключить, что наиболее перспективным подходом в исследовании аэроупругого поведения лопаточного венца турбомашин является подход, основанный на трехмерной модели нестационарной аэродинамики и модальном анализе движения лопатки (метод решения связанной аэроупругой задачи). Данный метод решения связанной задачи нестационарной аэродинамики и упругих колебаний лопаток позволит прогнозировать амплитудно-частотный спектр колебаний лопаток в трехмерном потоке газа, включая вынужденные, самовозбуждающиеся колебания с целью повышения надежности лопаточных аппаратов турбомашин.

Ключевые слова: связанная задача, метод прогнозирования флаттера, нестационарная нагрузка, собственная форма, трехмерная модель потока.

V. DONCHENKO, V. GNESIN, L. KOLODYAZHNAYA, I. KRAVCHENKO, A. PETROV
PREDICTING THE FLUTTER OF THE FAN ROW IN THE AIRCRAFT ENGINE

The aeroelasticity of the cascades of blades is considered to be the most burning and important problem, because it effects the reliability of the flow channels of turbine machines. The main complexity of the investigation of aeroelastic phenomena that occur in turbine machines consists in the need of the simulation of the interaction of the two physical environments (liquid and elastic). One of the approaches to the computation of aeroelastic phenomena (the flutter) is the nonstationary aerodynamic analysis that studies nonstationary flows in turbine machines independently of their origin and over the past decades it covered the way from the linear theory to the solution of Navier-Stokes equations. The second approach to the investigation of the aeroelasticity of the cascades of blades of turbine machines is related to the studies of the motion of blades under the action of aerodynamic forces induced by the nonuniformity of the main flow and independent of the motion of the blades. These approaches ignore the influence of vibrating blades on the main gas flow. Within the framework of individual problems considered in scientific papers the problem of self-excited vibrations (the flutter) that are the most complicated and least studied phenomena falls out of consideration. Based on the analysis of the contemporary state of the problem dealing with the turbine machine aeroelasticity and available methods of the flutter prediction we can draw a conclusion that the most promising approach to the investigation of the aeroelastic behavior of the blade row of the turbine machine is the approach that is based on the three-dimensional model of the nonstationary dynamics and the modal analysis of the blade motion (the method of the solution of the coupled aeroelastic problem). This method of the solution of the coupled problem of the nonstationary aerodynamics and elastic vibrations of the blades will enable the prediction of the amplitude-&-frequency spectrum of blade vibrations in the three-dimensional gas flow, including forced self-excited vibrations in order to increase the reliability of the cascades of blades of turbine machines. Using the developed numerical method, we analyzed the aeroelastic behavior of the fan row of the aircraft engine in different modes. The computation data confirmed the appearance of nonstationary modes in the fan operation. The research done allows us to give recommendations on the elimination of the aeroelastic phenomena, i.e. the flutter (by changing the fan blade geometry).

Key words: coupled problem, flutter prediction method, nonstationary loading, natural mode and three-dimensional flow model.

Вступ

Однією з найбільш складних проблем при проектуванні турбомашини є прогнозування втомних напружень в робочих лопатках. Ці напруження виникають при коливаннях лопаток з частотами близькими до частот власних форм, що здійснюються під дією зовнішніх збурень (вимушені коливання) і в результаті самозбудження (флатер).

Режим коливань визначається співвідношенням сил, що обурюються і сил механічного демпфування і аеродемпфування. Якщо при коливаннях

лопаток енергія основного потоку підводиться до лопаток, відбувається зростання самозбудних коливань (флатер).

Тому важливо прогнозувати аеропружну поведінку лопаткового вінця, щоб виключити можливість прояву аеропружної нестійкості, такої як флатер [1, 2].

Моделювання аеропружних явищ засноване на маршовій за часом схемі, що включає інтегрування рівнянь аеродинаміки і динаміки пружних коливань (зв'язана задача потоку і пружної системи) [3, 4].

На підставі розв'язання зв'язаної задачі аеродинаміки нестационарного потоку газу і динаміки коливних лопаток можна прогнозувати амплітудно-частотний спектр коливань лопаток в тривимірному потоці газу, включаючи вимушені, самозбудні коливання з метою підвищення надійності лопаткових апаратів турбомашин [4–8].

Мета роботи

Основна мета – підвищення надійності і продовження ресурсу лопаткових апаратів ГТД шляхом прогнозування та зменшення нестационарних навантажень і амплітуд коливань лопаткових апаратів на підставі розв'язання зв'язаної задачі аеродинаміки і пружних коливань лопаток в тривимірному потоці ідеального газу [4–8].

Постановка аеропружної задачі

Тривимірна нестационарна трансзвукова течія ідеального газу через обертовий вінець вентилятора ГТД з 24 коливними лопатками описується повною системою рівнянь Ейлера, представленої в інтегральній формі законів збереження [5–9]. З огляду на неперіодичність потоку в коловому напрямку, в розрахункову область слід включати всі лопатки ротора.

На рис. 1 показана різницева $H-H$ сітка для міжлопаткового каналу вентилятора в тангенціальній площині для середнього перетину. Кількість сіткових вузлів в кожному міжлопатковому каналі – $32 \times 41 \times 70 = 91840$.

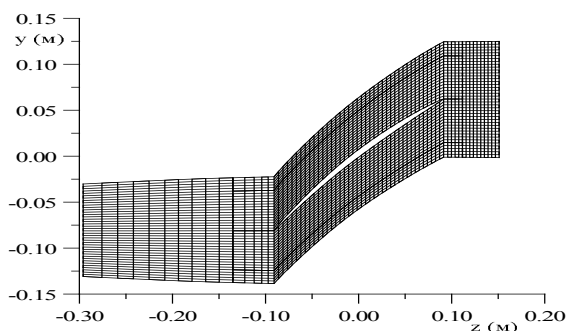


Рис. 1 – Тангенціальна різницева $H-H$ сітка в середньому перетині

Постановка граничних умов на вході і виході заснована на одновимірній теорії характеристик [5–8] і представлена у вигляді:

- на вході – тиск і температура загальмованого потоку,
- мерідиональний і тангенціальний кути потоку задані;
- на виході – статичний тиск за робочим вінцем.

Граничні умови доповнюються співвідношеннями на характеристиках у вхідному і вихідному перетинах розрахункової області.

Для чисельної інтеграції рівнянь Ейлера застосовується різницева схема Годунова-Колгана 2-го порядку точності по координатах і часі, узагальнена на випадок довільної просторової різницевої сітки, що деформується [3, 10].

Пружна модель лопатки, що коливається, описується з використанням модального підходу [4–8].

Рішення аеропружної зв'язаної задачі засновано на послідовному за часом інтегруванні рівнянь газодинаміки і рівнянь коливань лопаток з обміном інформацією на кожному кроці ітерації.

Чисельний аналіз

Чисельне дослідження проведено для лопаткового вінця вентилятора для режиму $n = 3610$ об/хв при різних значеннях МЛФК (міжлопатковий фазовий кут).

Граничні умови прийняті:

- змінний по радіусу тиск і температура загальмованого потоку перед вентилятором $P_0 = 100515 \dots 100428$ Па; $T_0 = 288^\circ$ К;
- кути потоку в коловому (α) і радіальному (γ) напрямках задані;
- змінний по радіусу статичний тиск за вентилятором $P_2 = 99850 \dots 111370$ Па;
- число обертів ротора $n = 3610$ об/хв.

У розрахунках враховувалися п'ять власних форм, власні частоти кожній з форм приведені нижче.

Номер власної форми	1	2	3	4	5
Частота, ν_i , Гц	91	212	393	454	635

У роботі приведені результати чисельного аналізу нестационарних аеродинамічних характеристик вентилятора ГТД.

На першому етапі виконані аеродинамічні розрахунки лопаткового вінця вентилятора при заданому законі коливань лопаток. Всі 24 лопатки здійснюють гармонійні коливання по кожній з власних форм по одному і тому ж закону з постійним кутом зрушення фаз δ (МЛФУ = 0° , 180° , $\pm 90^\circ$ з врахуванням взаємодії п'яти власних форм):

$$q_{i,j} = q_{i0} \sin[2\pi \nu_i t + (j-1)\delta], \quad (1)$$

де q_{ij} – модальний коефіцієнт; i – номер власної форми; j – номер лопатки; q_{i0} – амплітуда коливань i -ої власної форми; ν_i – власна частота; δ – міжлопатковий кут зрушення по фазі коливань сусідніх лопаток.

Аеропружна стійкість системи «потік повітря – лопатковий вінець» без врахування механічного демпфування визначається аеродинамічним коефі

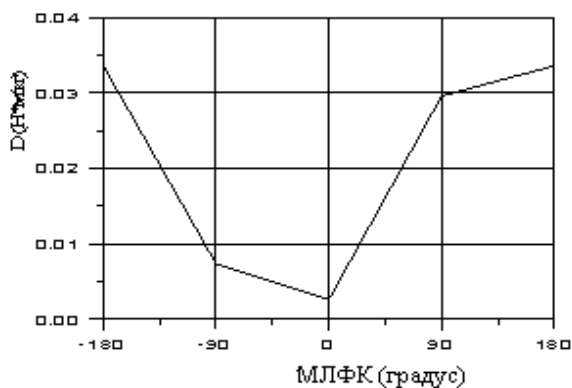


Рис. 2 – Залежність усередненого по висоті лопатки коефіцієнта аеродемпфування від МЛФК для 1–5 власних форм коливань

цієнтом демпфування D , рівним узятому із знаком «мінус» коефіцієнту роботи W , здійснюваним аеродинамічним навантаженням за один період коливань [5–8]. Знак «мінус» сумарної роботи

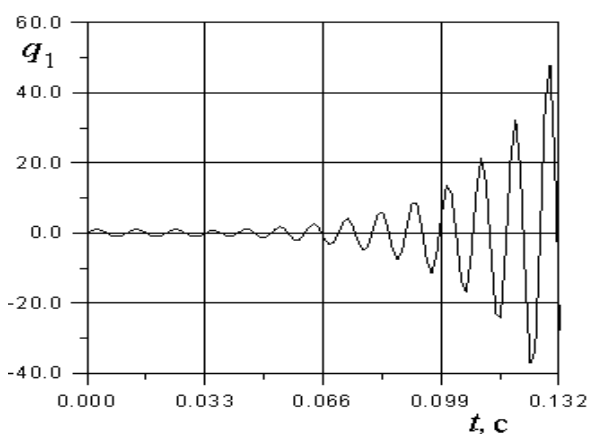
($D > 0$) відповідає аеродемпфуванню, знак «плюс» – самозбудженню лопатки ($D < 0$).

Характер обміну енергією між потоком повітря і лопатками, що коливаються, показаний на рис. 2 (вплив міжлопаткового кута зрушення по фазі коливань лопаток на усереднений по довжині коефіцієнт аеродемпфування).

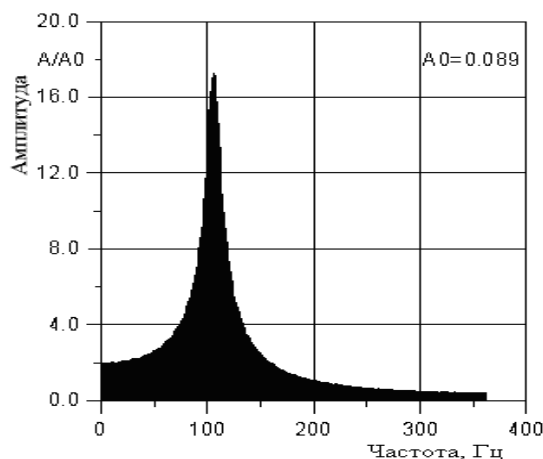
Максимальне аеродемпфування має місце при коливаннях із зрушенням фаз МЛФК = 180°, МЛФК = 90° град, мінімальне значення – при МЛФК = 0°, МЛФК = -90°.

Остаточну оцінку аеропружної поведінки лопаткового вінця можна отримати при рішенні зв’язаної задачі аеродинаміки і пружних коливань. В цьому випадку реакція лопаток залежатиме не лише від гармонійних коливань, але і від аеродинамічної взаємодії і обміну енергією між нестационарним потоком і лопатками, що коливаються.

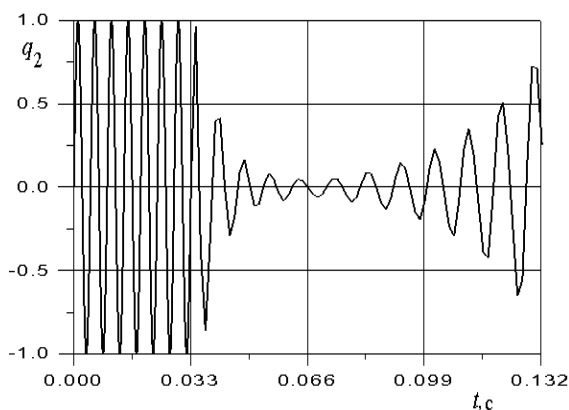
Другий етап розрахунку – проведені аеродинамічні розрахунки лопаткового вінця вентилятора, що обертається, в повітряному потоці при зв’язаних коливаннях.



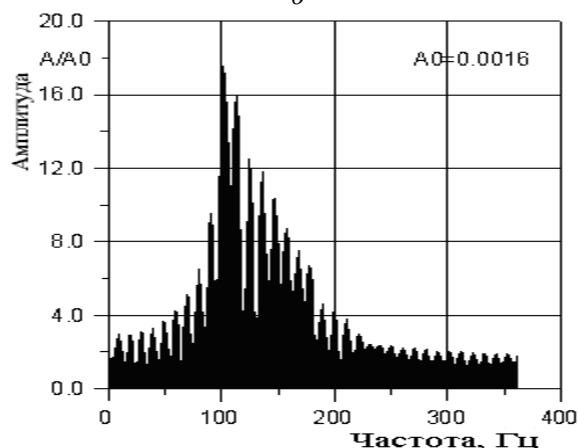
а



б



в



г

Рис. 3 – Зміна модального коефіцієнта (МЛФК = 0):
 а – модальний коефіцієнт для 1-ої власної форми; б – амплітудно-частотний спектр для 1-ої власної форми; в – модальний коефіцієнт для 2-ої власної форми; г – амплітудно-частотний спектр для 2-ої власної форми

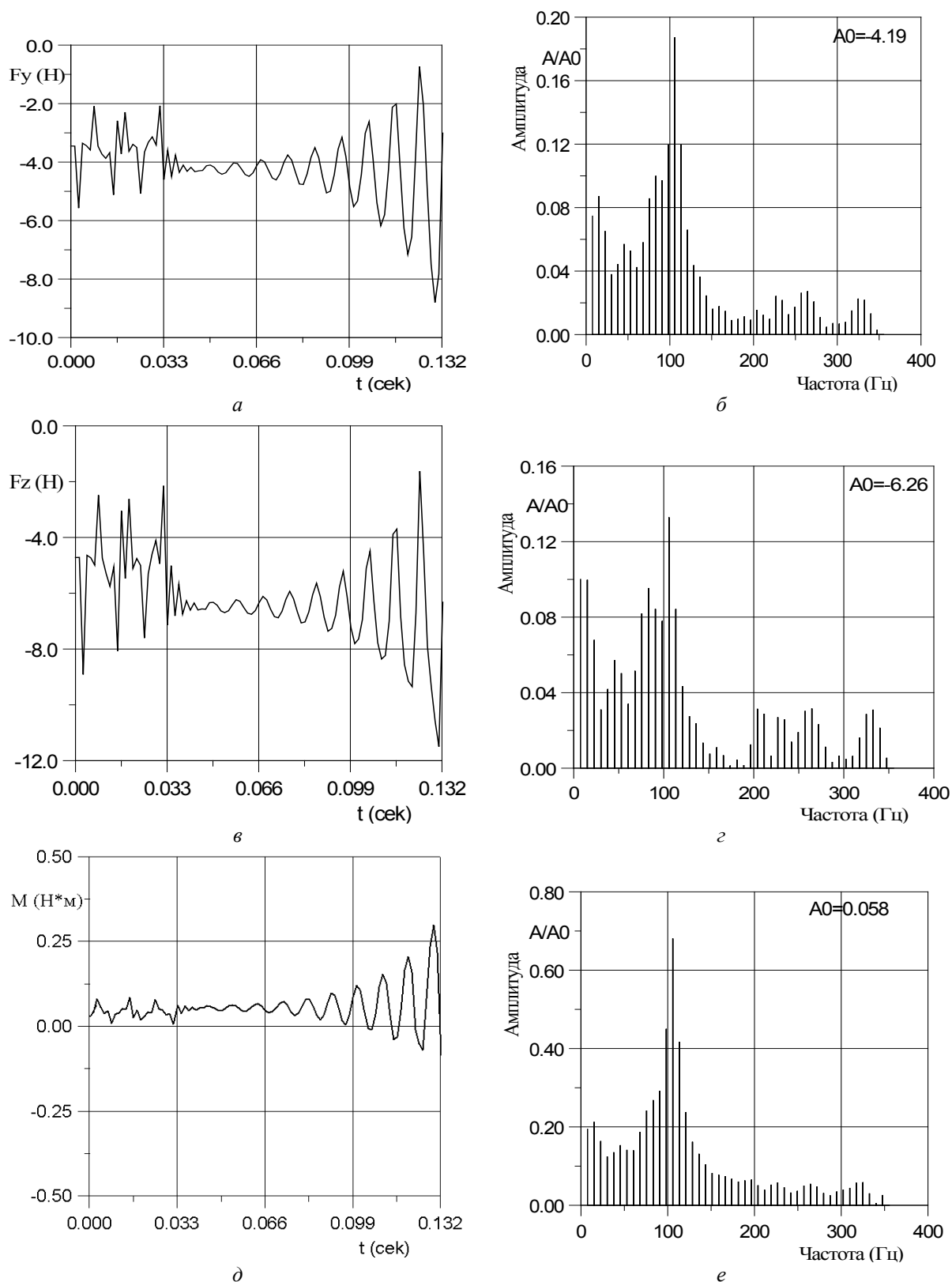


Рис. 4 – Зміна нестационарної аеродинамічної сили, діючої на периферійний шар лопатки вентилятора (МЛФК = 0 град): *a* – в коловому напрямі; *б* – амплітудно-частотний спектр; *в* – в осьовому напрямі; *г* – амплітудно-частотний спектр; *д* – момент відносно центра тяги; *е* – амплітудно-частотний спектр

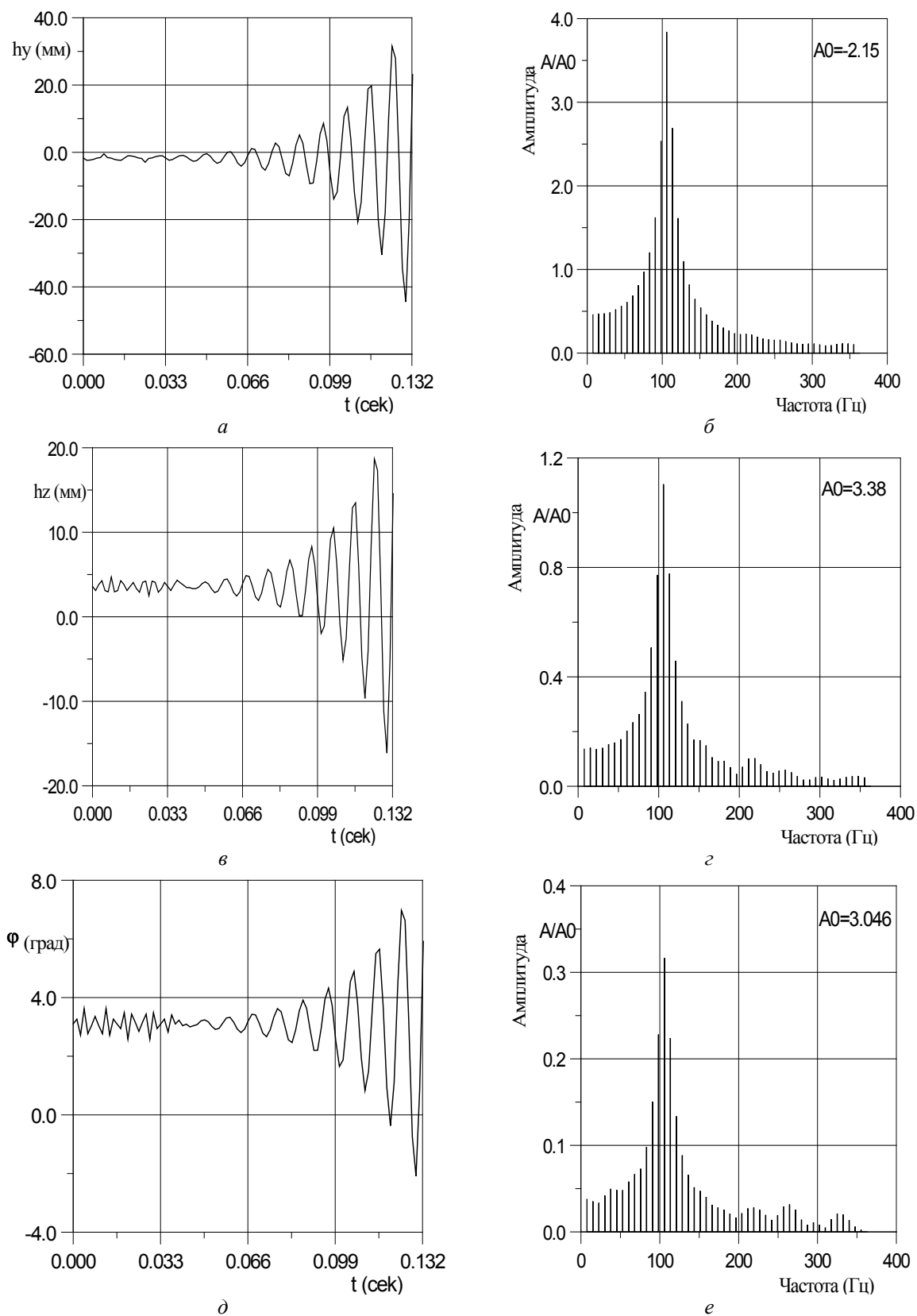


Рис. 5– Переміщення периферійного перетину робочої лопатки вентилятора (МЛФК = 0 град)
 а – в коловому напрямі; б – амплітудно-частотний спектр; в – в осьовому напрямі;
 г – амплітудно-частотний спектр; д – кут повороту відносно центру тяжіння;
 е – амплітудно-частотний спектр

На рис. 3а–г приведені графіки зміни в часі модальних коефіцієнтів 1-ої і 2-ої власних форм q_i (i – номер форми) для МЛФК = 0 град і їх амплітудно-частотні характеристики (протягом 1-го періоду $t = 0..0,033$ сек здійснюються гармонійні коливання, починаючи з $t = 0,033..0,132$ сек – зв'язані коливання).

Коливання по всіх формах збуджуються з частотами близькими до частоти 1-ої власної форми.

Коливання лопаток приводять до появи нестационарних аеродинамічних навантажень, які діють на лопатки. Починаючи з моменту часу $t = 0,033$ сек (стартовий режим зв'язаних коливань) подальший рух лопаток визначається нестационарними силами, що діють на лопатки, які, у свою чергу, залежать від коливань лопаток, тобто рух лопаток і сили, діючі на них, знаходяться з рішення зв'язаної задачі.

На рис. 4 приведені графіки нестационарних аеродинамічних навантажень (колова, осьова сила і аеродинамічний момент), що діють у периферійному шарі, а також їх амплітудно-частотні спектри (МЛФК = 0 град., відповідного найбільшому збудженню).

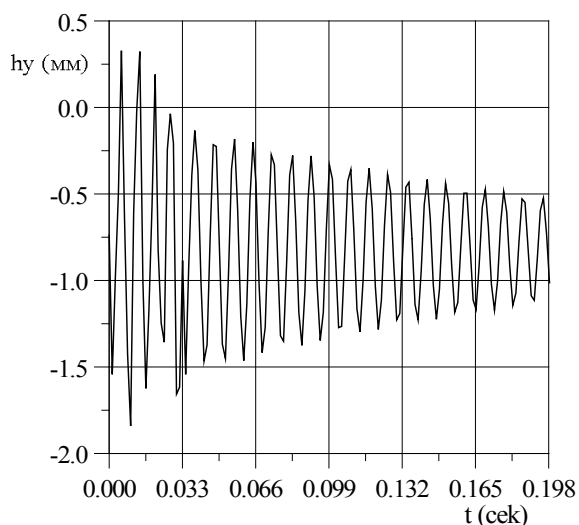


Рис. 6 – Переміщення периферійного перетину робочої лопатки в коловому напрямі (1–5 форм; МЛФК=0; 1-а власна частота дорівнює 135 Гц)

Висновки

1 Метод рішення зв'язаної задачі нестационарної газодинаміки і пружних коливань лопаток дозволяє розраховувати коливання, що самозбуджуються, включаючи вимушені коливання, викликані взаємним обміном енергією між нестационарним потоком газу і лопатками, що коливаються.

На рис. 5 приведені графіки коливань периферійного перетину лопатки в коловому напрямі, осьовому і поворот відносно центру тяги для МЛФК = 0 град з врахуванням взаємодії п'яти власних форм коливань. Найбільший вклад в нестационарні складові коливань в коловому напрямі вносить частота близька до частоти 1-ої власної форми (100 Гц), в осьовому напрямі – частота близька до частоти 1-ої власної форми (100 Гц).

Всі режими характеризуються збудженням коливань (флатер).

Для оцінки аеродинамічної стійкості коливань лопаток вентилятора був проведений чисельний аналіз впливу частоти 1-ої власної форми на режим коливань лопаток при МЛФК = 0° з врахуванням взаємодії п'яти власних форм (рис. 6, 7). Показано, що підвищення власної частоти 1-ої форми приводить до збільшення аеродинамічної стійкості коливань лопаток (при частотах 135 Гц, 152 Гц відбувається аеродемпфування).

Таким чином, підвищення аеродинамічної стійкості коливань лопаткового вінця вентилятора по відношенню до флатеру пов'язане з підвищенням власної частоти коливань, тобто жорсткості лопаток.

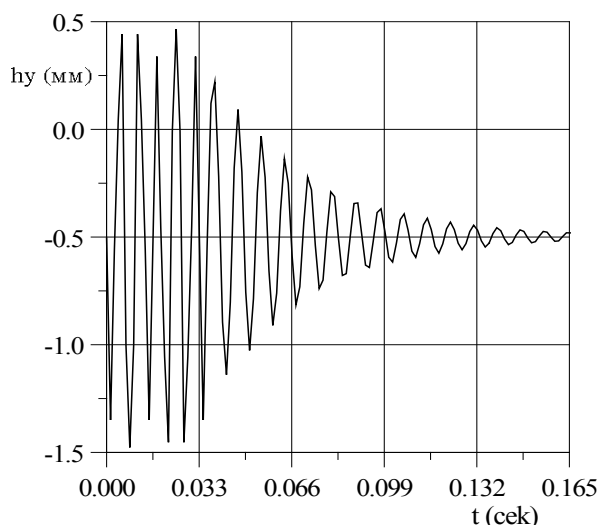


Рис. 7 – Переміщення периферійного перетину робочої лопатки в коловому напрямі (1–5 форм; МЛФК = 0; 1-а власна частота дорівнює 152 Гц)

2 Проведений чисельний аналіз аеропружних характеристик лопаткового вінця вентилятора для режиму експлуатації ($n = 3610$ об/хв). Чисельний аналіз зв'язаних коливань підтвердив для даного режиму самозбудження коливань лопаток вентилятора (флатер) по 1-ій власній формі, що приводить до зростання амплітуд коливань по всіх власних формах з частотою, близькою до власної частоти 1-ої форми.

3 Дано рекомендації по підвищенню аеропружної стійкості для заданого режиму, пов'язані з підвищенням жорсткості лопаток.

Список літератури

1. Гнесин В. И., Колодяжная Л. В. Аэроупругие явления в турбомашинках. *Аэродинамика и Аэроакустика : Проблемы и перспективы : сб. научных трудов*. Харьков: ХАИ, 2009. № 3. С. 53–62.
2. Vahdati M., Simpson G., Imregun M. Mechanisms for wide-chord fan blade flutter. *Journal Turbomachinery*. 2011. Vol. 133.
3. Cinnella P., Palma De, Pascasio G., Napolitano M. A Numerical Method for Turbomachinery Aeroelasticity. *Journal of Turbomachinery*. Vol. 126. April, 2004. pp. 310–316.
4. Sadeghi M., Liu F. Investigation of non-linear flutter by a coupled aerodynamics and structural dynamics method. *AIJA Journal*. 2001. 0573.
5. Gnesin V. I., Kolodyazhnaya L. V. Numerical Modelling of Aeroelastic Behaviour for Oscillating Turbine Blade Row in 3D Transonic Ideal Flow. *J. Problems in Mash. Eng.* 1999. Vol. 1, No. 2. pp. 65–76.
6. Гнесин В. И., Колодяжная Л. В. Аэроупругий анализ лопаточного венца турбомашинки на основе численного решения связанной задачи аэродинамики и упругих колебаний. *Проблемы машиностроения*. 1998. Т. 1, № 3–4. С. 29–40.
7. Gnesin V. I., Kolodyazhnaya L. V., Rzakowski R. A Coupled Fluid- Structure Analysis for 3D Flutter in Turbomachines. *ASME 2000-GT-380, Intern. Gas Turbine and Aeroengine Congress, Munich, Germany, 8–11 May, 2000*. pp. 1–8.
8. Гнесин В. И., Колодяжная Л. В., Кравченко И. Ф., Меркулов В. М., Шереметьев А. В., Петров А. В. Численный анализ аэроупругого поведения лопаточного венца вентилятора авиационного двигателя. *Проблемы машиностроения*. 2017. Т. 20, № 3. С. 3–11.
9. Rougeault-Sens A.-S., Dugeai A. Numerical unsteady aerodynamics for turbomachinery aeroelasticity. *Unsteady Aerodynamics, Aeroacoustics and Aeroelasticity of Turbomachines*. 2006. Springer, Printed in the Netherlands. pp. 423–436.
10. Годунов С. К., Забродин А. В., Иванов М. Я., Крайко А. Н., Прокопов Г. П. *Численное решение многомерных задач газовой динамики*. Москва: Наука, 1976. 400 с.

References (transliterated)

1. Gnesin, V. I. and Kolodyazhnaya, L. V. (2009), "Ajerouprugie javlenija v turbomashinah [The aeroelastic phenomena in the turbomachines]", *Aerogidrodinamic and Aeroacoustics: Problems and prospects*, no. 3, pp. 53–62.
2. Vahdati M., Simpson G. and Imregun M. (2011), "Mechanisms for wide-chord fan blade flutter", *Journal Turbomachinery*, vol. 133.
3. Cinnella, P., Palma De, Pascasio G., Napolitano M. (2004), "A Numerical Method for Turbomachinery Aeroelasticity", *Journal of Turbomachinery*, vol. 126, April, 2004. pp. 310–316.
4. Sadeghi M., Liu F. (2001), "Investigation of non-linear flutter by a coupled aerodynamics and structural dynamics method", *AIJA Journal*, 0573.
5. Gnesin, V. I. and Kolodyazhnaya, L. V. (1999), "Numerical Modelling of Aeroelastic Behaviour for Oscillating Turbine Blade Row in 3D Transonic Ideal Flow", *J. Problems in Mash. Eng.*, vol. 1, no. 2, pp. 65–76.
6. Gnesin, V., Kolodyazhnaya, L. (1998), "Aeroelastic analysis of turbine blade row on the base of numerical solution for coupled problem of aerodynamics and elastic oscillations", *J. Problems in Mash. Eng.*, no. 3–4, pp. 29–40.
7. Gnesin V. I., Kolodyazhnaya L. V., Rzakowski R. (2000), A Coupled Fluid- Structure Analysis for 3D Flutter in Turbomachines", *ASME 2000-GT-380, Intern. Gas Turbine and Aeroengine Congress, Munich, Germany, 8–11 May, 2000*, pp. 1–8.
8. Gnesin V. I., Kolodyazhnaya L. V., Kravchenko I. F., Merkulov V. M., Sheremetyev A. V., Petrov A. V. (2017), "Chislenyy analiz ajerouprugogo povedeniya lopatochnogo ventsa ventilatora aviatsionnogo dvigatelya", *Problemy mashinostroyeniya*, vol. 20, no. 3, pp. 3–11.
9. Rougeault-Sens A.-S., Dugeai A. (2006), "Numerical unsteady aerodynamics for turbomachinery aeroelasticity", *Unsteady Aerodynamics, Aeroacoustics and Aeroelasticity of Turbomachines*. Springer, Printed in the Netherlands. pp. 423–436.
10. Godunov, S. K., Zabrodin A. V., Ivanov M. Y., Krayko A. N., Prokopov G. P. (1976), *Chislennoe reshenie mnogomernyh zadach gazovoy dinamiki* [The Numerical solution of multidimensional tasks of gas dynamics], Nauka, Moscow, 400 p.

Надійшла (received) 30.06.2020

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Донченко Вячеслав Володимирович (Донченко Вячеслав Владимирович, Donchenko Viacheslav) – Інженер-конструктор 1-ї категорії ДП «Івченко-Прогрес», м. Запоріжжя, Україна; e-mail: 03530@ivchenko-progress.com, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9585-2991>.

Гнесін Віталій Ісайович (Гнесин Виталий Исаевич, Gnesin Vitaly) – доктор технічних наук, професор, провідний науковий співробітник відділу гідроаеромеханіки енергетичних машин, Інститут проблем машинобудування ім. А. М. Підгорного НАН України; м. Харків, Україна; e-mail: gnesin@ukr.net, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6411-6158>.

Колодяжна Любов Володимирівна (Колодяжная Любовь Владимировна, Kolodyazhnaya Lyubov) – доктор технічних наук, старший науковий співробітник, провідний науковий співробітник відділу гідроаеромеханіки енергетичних машин, Інститут проблем машинобудування ім. А. М. Підгорного НАН України; м. Харків, Україна; e-mail: lyubovvladimirovna60@gmail.com, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5469-4325>.

Кравченко Ігор Федорович (Кравченко Игорь Федорович, Kravchenko Igor) – доктор технічних наук, директор підприємства, генеральний конструктор ДП «Івченко-Прогрес», м. Запоріжжя, Україна; e-mail: progress@ivchenko-progress.com.

Петров Олексій Володимирович (Петров Алексей Владимирович, Petrov Oleksii) – кандидат технічних наук, керівник групи статичної та динамічної міцності роторів компресорів ДП «Івченко-Прогрес», м. Запоріжжя, Україна; e-mail: 03530@ivchenko-progress.com, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8819-0125>.