

УДК 336.71

Программный комплекс для исследования колебаний рабочих колёс турбомашин с расстройкой параметров

© И.Н. Рыжиков

*Иркутский национальный исследовательский технический университет,
г. Иркутск, Российская Федерация*

Аннотация. Рабочие колёса турбомашин являются основным элементом конструкции турбомашин, выполняющим их основные функции: преобразование кинетической энергии газов во вращательное движение ротора (в турбинах) либо, наоборот, вращение ротора в увеличение потенциальной энергии воздуха путём его сжатия (в компрессорах). Конструкции рабочих колёс отличаются высокой геометрической точностью. Как показывают исследования многих авторов, малейшее отклонение в геометрии секторов колеса (так называемая расстройка параметров) может привести к значительному изменению частот, форм колебаний и, соответственно, динамических напряжений в материале, что, в свою очередь, может существенно снизить их долговечность. Обычно при проектировании рабочих колёс расчёты на колебания осуществляются с использованием их циклически симметричных моделей, не учитывающих расстройку. При таком подходе существует опасность неверного прогноза долговечности рабочих колёс. В данной работе представлены результаты исследований колебаний и долговечности рабочего колеса с расстройкой с использованием разработанного автором программного комплекса Ocs_Rotor. Определяемые вначале собственные частоты и формы колебаний затем используются при определении динамических напряжений. При определении долговечности рабочих колёс турбомашин используются различные гипотезы накопления повреждений, в основе которых лежит метод разложения напряжений в материале по уровням.

Ключевые слова: метод конечных элементов, характеристика колебаний, расстройка, рабочее колесо турбомашин, динамические напряжения, долговечность

A software package for studying vibrations of mistuned bladed disks of turbomachines

© Igor N. Ryzhikov

*Irkutsk National Research Technical University,
Irkutsk, Russian Federation*

Abstract. The bladed disks are the main structural element of turbomachines that perform their main functions: converting the kinetic energy of gases into rotary motion of the rotor (in turbines) or, conversely, the rotation of the rotor to increase the potential energy of air by compressing it (in compressors). Design impellers have high geometric accuracy. As studies by many authors show, the slightest deviation in the geometry of the impeller sectors (the so-called mistuning of parameters) can lead to a significant change in frequencies, vibration modes and, accordingly, dynamic stresses in the material, which, in turn, can significantly reduce their durability. Usually, when designing impellers, vibrations are calculated using their cyclically symmetric models that do not take into account mistuning. With this approach, there is a danger of incorrect prediction of the impeller durability. This paper presents the results of studies of vibrations and durability of the mistuned impeller using the Ocs_Rotor software package developed by the author. The natural frequencies and vibration modes determined initially are then used to determine the dynamic stresses. When determining the durability of the impellers of turbomachines, various hypotheses of damage accumulation are used, which are based on the method of decomposition of stresses in the material by levels.

Keywords: finite element method, vibration characteristics, mistuning, turbomachine impeller, dynamic stresses, durability

Расстройка параметров является одним из важных факторов, который может оказывать значительное влияние на колебания и долговечность рабочих колёс турбомашин. Как показывают исследования некоторых авторов, даже однопроцентное отклонение в массе одной лопатки колеса может привести

к увеличению динамических напряжений при вынужденных колебаниях на 20 % в результате локализации колебаний, что неизбежно приведёт к снижению долговечности турбомашин. В работах [1–10] описано влияние расстройки параметров рабочих колёс ротора на характеристики колебаний и

долговечность рабочих колёс турбомашин.

Для прогнозирования колебаний и долговечности рабочих колёс турбомашин часто используются параллельно экспериментальные и численные методы исследований, в частности метод конечных элементов (МКЭ). Экспериментальные исследования требуют очень больших затрат времени, результаты могут иметь недостаточную точность. МКЭ имеет общий алгоритм, простое использование и является эффективным инженерным средством, которое позволяет в короткое время выполнить расчёты.

Решение проблемы собственных значений циклически симметричной системы без расстройки параметров на основе МКЭ может быть получено непосредственно из уравнения свободных колебаний [1, 2]

$$M\ddot{\delta} + K\delta = 0, \quad (1)$$

$$\text{причём } \delta = \delta_0 \cos(\omega t - \beta) \quad (2)$$

где M – матрица масс конструкции, K – матрица жёсткости конструкции, $\ddot{\delta}$ – ускорение узловых точек, δ – вектор перемещений, δ_0 – амплитуда, а ω – круговая частота системы, β – фаза колебаний.

После преобразования получим

$$(K - \omega^2 M)\delta_0 = 0. \quad (3)$$

В качестве тестового примера рассмотрена расстройка рабочего колеса с 29 лопатками. Общий вид конечно-элементной модели рабочего колеса представлен на рис. 1.

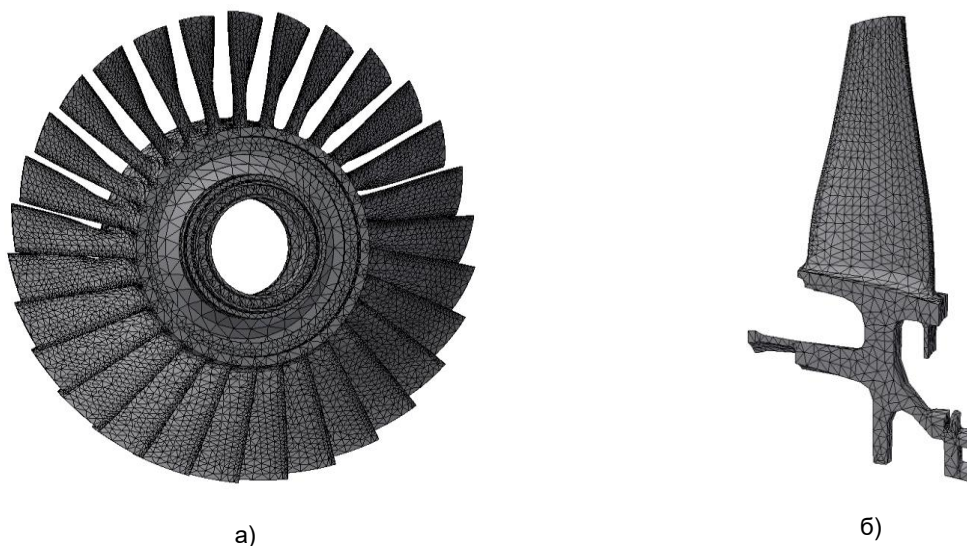


Рис. 1. Конечно-элементная модель рабочего колеса (а – полный диск; б – один сектор)

Общая схема определения значений собственных колебаний рабочих колёс турбомашин в программе Ocs_Rotor на основе МКЭ показана на рис. 2.

Созданный программный комплекс реализован по блок-схеме на языке программного пакета MATLAB, главное окно показано на рис. 3.

Программа имеет модульную структуру. Входной модуль считывает геометрию и свойства материала рабочего колеса. Ре-

зультаты работы программы (формы, частоты в виде таблицы Excel и графики сравнения с экспериментальными результатами и результатами ANSYS) формируются модулем вывода результатов.

Результаты расчёта частот в программе Ocs_Rotor в сравнении с экспериментом приведены в таблице. Результаты хорошо согласуются с экспериментальными данными.

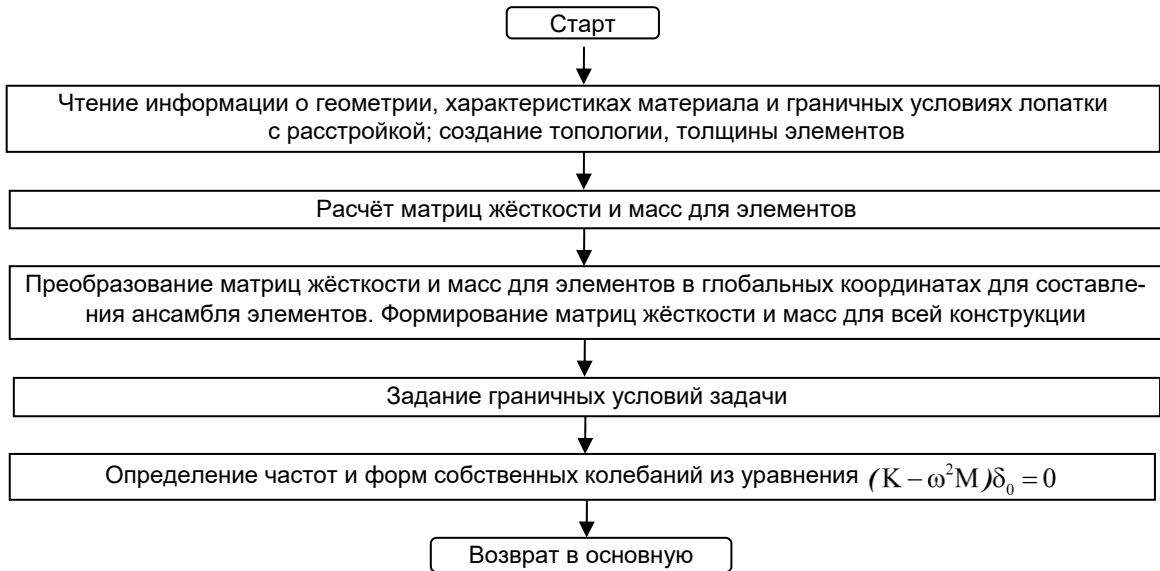


Рис. 2. Блок-схема алгоритма определения собственных значений частот и форм колебаний рабочих колёс турбомашин

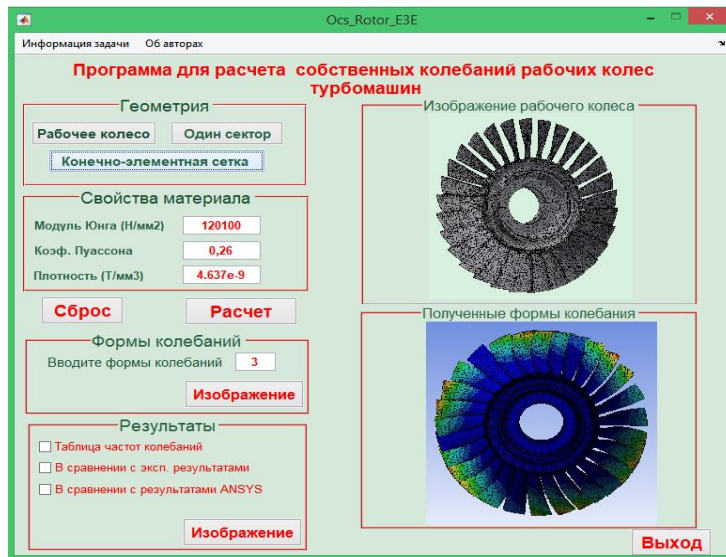


Рис. 3. Главное окно программы

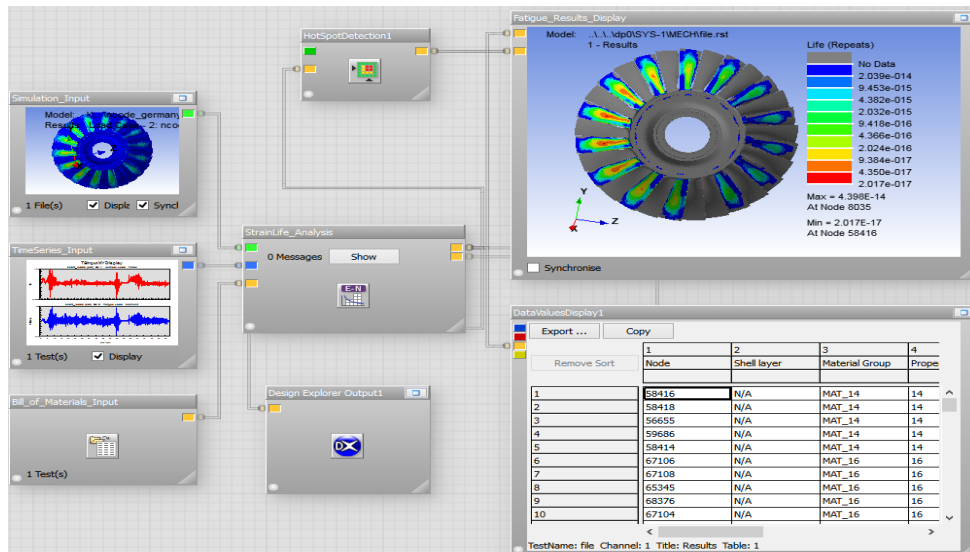


Рис. 4. Схема определения долговечности рабочих колёс турбомашин в пакете ANSYS nCode DesignLife

Результаты расчёта

№ лопаток	f_Mode 1		f_Mode 2		f_Mode 3	
	Эксп.	Осч.	Эксп.	Осч.	Эксп.	Осч.
1	403,8	416,3	1255,0	1304,5	1766,0	1843,3
2	404,4	416,3	1256,4	1305,5	1767,0	1843,3
3	405,0	416,4	1257,3	1305,5	1768,0	1843,3
4	403,7	416,4	1254,7	1307,3	1766,6	1843,5
5	403,0	416,4	1251,9	1307,3	1765,6	1843,5
6	403,0	416,4	1251,8	1308,6	1764,6	1844
7	403,4	416,6	1252,8	1308,6	1763,8	1844,
8	404,5	416,6	1255,8	1309,4	1766,6	1844,5
9	405,0	416,7	1256,1	1309,4	1766,3	1844,5
10	404,5	416,8	1256,8	1310,2	1766,7	1844,8
11	404,0	416,8	1254,6	1310,2	1764,5	1844,8
12	404,8	417,3	1256,7	1311,1	1769,2	1845
13	403,1	417,4	1252,0	1311,1	1764,9	1845,
14	402,6	417,9	1250,3	1312,1	1764,6	1845,1
15	403,5	417,9	1252,9	1312,2	1765,5	1845,1
16	404,4	418,5	1254,8	1313,2	1765,4	1845,2
17	405,0	418,5	1256,6	1313,2	1766,7	1845,2
18	404,5	419,1	1256,0	1314,2	1766,6	1845,3
19	403,7	419,1	1254,0	1314,2	1767,5	1845,3
20	403,0	419,5	1251,0	1315,2	1766,6	1845,4
21	403,7	419,5	1253,4	1315,2	1766,9	1845,4
22	405,3	419,9	1256,8	1315,9	1768,5	1845,5
23	404,8	419,9	1256,4	1315,9	1768,3	1845,5
24	404,2	420,2	1255,0	1316,5	1767,2	1845,6
25	404,0	420,2	1254,0	1316,5	1765,9	1845,6
26	402,4	420,3	1250,6	1316,9	1761,4	1845,6
27	402,6	420,3	1250,4	1316,9	1760,4	1845,6
28	402,3	420,4	1250,2	1317,1	1760,1	1845,7
29	402,8	420,4	1252,4	1317,1	1761,3	1845,7

Долговечность рабочих колёс турбомашин с расстройкой параметров определяется методом классификации напряжений по группам, а динамические напряжения определяются на основе собственных частот и форм колебаний. Поэтому для оценки влияния расстройки на долговечность рабочих колёс необходимо определить их характеристики собственных колебаний. На рис. 4 и 5 показаны схема и некоторые результаты долговечности рабочих колёс, рассчитываемые в пакете ANSYS nCode DesignLife программного комплекса ANSYS.

Выводы. Представлена программа Ocs_Rotor, реализующая численные алгоритмы для расчёта собственных колебаний, и схема определения долговечности рабочих колёс турбомашин. В результате использования разработанной программы по-

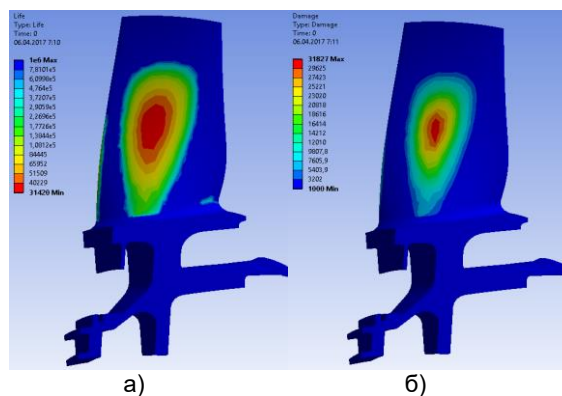


Рис. 5. Основные результаты исследования (а – долговечность; б – усталостное повреждение)

лучены формы и собственные значения частот колебаний, которые хорошо согласуются с экспериментальными данными. На основе полученных результатов расчёта параметров колебаний сделан прогноз долговечности рабочего колеса.

Библиографический список

1. Рыжиков И.Н. К оценке долговечности роторов газотурбинных двигателей // *Авиационное машиностроение и транспорт Сибири: сб. статей VI Всеросс. науч.-практ. конф. (г. Иркутск, 13–16 апреля 2016 г.)*. Иркутск: Изд-во ИРНТУ, 2016. С. 288–294.
2. Beirow B., Kühhorn A., Figaschewsky F., Bornhorn A., Repetckii O.V. Forced response reduction of a blisk by means of intentional mistuning // *ASME Turbo Expo 2018: Turbomachinery Technical Conference and Exposition (Oslo, 11–15 June 2018)*. 2018. [Электронный ресурс]. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=35741614> (06.03.2021).
3. Beirow B., Giersch T., Kühhorn A., Nipkau J. Optimization-Aided Forced Response Analysis of a Mistuned Compressor Blisk // *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*. 2015. Vol. 137. № 1. P. 1–10.
4. Beirow B., Kühhorn A., Figashevsky F., Bornhorn A., Repetckii O.V. Forced response reduction of a blisk by means of intentional mistuning // *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*. 2019. Vol. 141. № 1. P. 011008.
5. Beirow B., Figaschewsky F., Kühhorn A., Bornhorn A. Modal Analyses of an Axial Turbine Blisk with Intentional Mistuning // *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*. 2018. Vol. 140. № 1. P. 012503.
6. Chan Y.-J., Ewins D.J. The Amplification of Vibration Response Levels of Mistuned Bladed Disks: Its Consequences and Its Distribution in Specific Situations // *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*. 2011. Vol. 133. № 10. P. 1–8.
7. Figaschewsky F., Kühhorn A. Analysis of Mistuned Blade Vibrations Based on Normally Distributed Blade Individual Natural Frequencies // *ASME Turbo Expo 2015: Turbine Technical Conference and Exposition (Montreal, 15–19 June 2015)*. 2015. [Электронный ресурс]. URL: <https://asmedigitalcollection.asme.org/GT/proceedings-abstract/GT2015/56772/V07BT32A020/237792> (06.03.2021).
8. Jugde J., Pierre C., Mehmed O. Experimental Investigation of Mode Localization and Forced Response Amplitude Magnification for a Mistuned Bladed Disk // *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*. 2001. Vol. 123. № 4. P. 940–950.
9. Repetskiy O., Ryjikov I. Modeling and simulation of dynamic processes with help of program package BLADIS+ // *Innovations and Advanced Techniques in Systems, Computing Sciences and Software Engineering*. 2008. P. 219–220.
10. Yuanqiu Taa, Chaoping Zang, Biao Zhou, Yongliang Duan, Petrov E.P. Sensitivity Analysis of High-Frequency Forced Response for Mistuned Bladed Discs Based on High-Fidelity Models // *ASME Turbo Expo 2016: Turbomachinery Technical Conference and Exposition (Seoul, 13–17 June 2016)*. 2016. [Электронный ресурс]. URL: <https://asmedigitalcollection.asme.org/GT/proceedings-abstract/GT2016/49835/V07AT32A025/238608> (06.03.2021).

Сведения об авторе / Information about the Author

Рыжиков Игорь Николаевич,
кандидат технических наук,
доцент кафедры машиностроительных технологий и материалов,
Институт авиационного машиностроения и транспорта,
Иркутский национальный исследовательский технический университет,
664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83, Российская Федерация,
e-mail: rin111@list.ru

Igor N. Ryzhikov,
Cand. Sci. (Technical Sciences),
Associate Professor at Engineering Technologies and Materials Department,
Institute of Aircraft Engineering and Transport,
Irkutsk National Research Technical University,
83 Lermontov Str., Irkutsk, 664074, Russian Federation,
e-mail: rin111@list.ru