

Савченко К. В.

Институт проблем
прочности
им. Г. С. Писаренко
НАН Украины

Savchenko K. V.

G.S. Pisarenko Institute
for Problems of Strength
National Academy of
Sciences of Ukraine

УДК 620.178.5

ВЛИЯНИЕ УСЛОВИЙ СОПРЯЖЕНИЯ БАНДАЖНЫХ ПОЛОК НА СПЕКТР СОБСТВЕННЫХ ЧАСТОТ КОЛЕБАНИЙ ЛОПАТОЧНОГО ВЕНЦА

Приведены результаты вычислительных экспериментов по определению закономерностей влияния ориентации контактных поверхностей полок на спектр собственных частот колебаний лопаточного венца с учетом действия поля центробежных сил и температуры газового потока.

Ключевые слова: турбинная лопатка, бандажная связь, ориентация контактных поверхностей, собственные частоты колебаний.

Введение и постановка задачи. Одной из причин разрушения рабочих лопаток турбин авиационных газотурбинных двигателей (АГТД) является их повышенная вибронпряженность из-за действия широкого спектра возмущающих сил, которая может привести к возникновению и распространению усталостных трещин. Чаще всего это связано с тем, что при совпадении частоты действующей нагрузки с собственной частотой венца, как системы с конструктивной циклической или поворотной симметрией, возникают опасные резонансные состояния, являющиеся источником высоких динамических напряжений в лопатках, которые в свою очередь могут привести к их разрушению. Поэтому решение задачи по определению спектра собственных частот колебаний лопаточных венцов рабочих колес остается

актуальным в современном турбомашиностроении [1 – 4].

Полочное бандажирование является наиболее распространенным способом снижения вибронпряженности рабочих лопаток за счет их объединения в замкнутую на круг систему или пакеты для уменьшения чувствительности к возбуждению колебаний. В практике проектирования рабочих лопаток турбин АГТД наибольшее распространение получили Z-образные и беззиговые бандажные полки [5], схемы взаимодействия которых показаны на рис. 1. Здесь α – угол наклона контактных поверхностей к плоскости вращения рабочего колеса; F_R – равнодействующая нормальных сил, действующих на контактных поверхностях. Преимущества и недостатки указанных типов полок проанализированы в [6, 7].

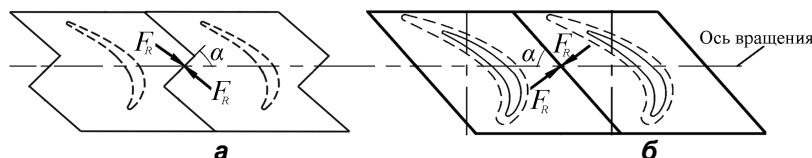


Рис. 1. Схемы взаимодействия Z-образных (а) и беззиговых (б) бандажных полок

Целью данной работы является расчетное определение влияния угла наклона контактных поверхностей бандажных полок разных типов к плоскости вращения

лопаточного венца на спектр его собственных частот колебаний.

Объект исследования и его моделирование. В качестве объектов исследования для проведения вычислительных



экспериментов было выбрано два венца, лопатки которых характеризуются Z-образной и беззиговой бандажными полками

соответственно. Фрагменты исследуемых венцов представлены на рис. 2.

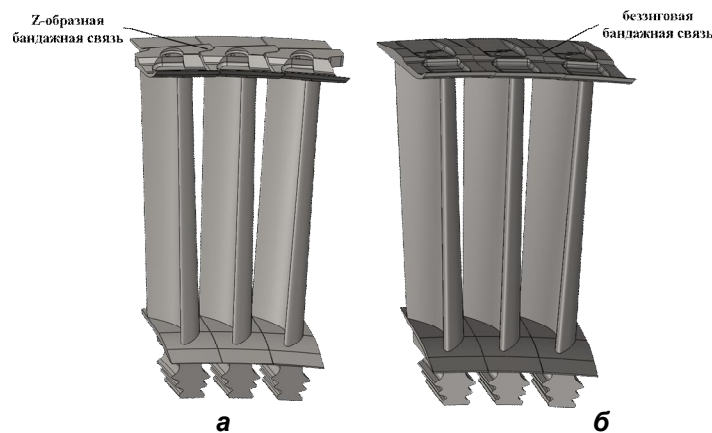


Рис. 2. Фрагменты лопаточных венцов с Z-образной (а) и беззиговой (б) бандажными полками

Конечноэлементная (КЭ) модель лопатки была построена в соответствии с положениями [8, 9] с использованием объемного 8-узлового конечного элемента SOLID 45.

Рассматриваемые лопаточные венцы представляют собой системы со строгой циклической симметрией, связь лопаток которых обуславливается их контактным взаимодействием по бандажным полкам. В этом случае при проведении вычислительных экспериментов можно ограничиться рассмотрением одного периода венца с соответствующими граничными условиями [10].

Граничные условия задавались следующим образом:

1. На контактных поверхностях хвостовика лопатки принималась жесткая заделка в соответствии с постановкой задачи. Данное условие не совсем точно моделирует реальные условия взаимодействия лопаток с диском и приводит к повышению расчетных значений собственных частот колебаний венцов [11, 12].

2. Взаимодействие лопаток в диске моделируется с помощью задания условий циклической симметрии на соответствующих поверхностях бандажной полки.

Результаты вычислительных экспериментов. Исследования проводились для значений угла наклона α контактных поверхностей бандажных полок в диапазоне их изменения $45^\circ \div 65^\circ$.

Для учета действия центробежных сил, уровень которых определяется скоростью вращения ω рабочего колеса, и температуры T предварительно решалась задача оценки статического напряженного состояния, после

которой накладывались условия совместности перемещений на узлы в области контакта бандажных полок, как показано в [13].

По результатам вычислительных экспериментов определялись собственные частоты колебаний p_{mn} лопаточного венца, на основании которых строились частотные функции в виде зависимостей нормализованной (относительной) частоты

колебаний $\bar{p}_{mn} = \frac{p_{mn}}{p_{00}}$ лопаточного венца от

числа узловых диаметров m , где n – число узловых окружностей; p_{00} – первая собственная частота колебаний лопаточного венца с углом наклона контактных поверхностей бандажных полок $\alpha = 45^\circ$.

Решение задачи осуществлялось для форм колебаний лопаточного венца при $n = 0$.

Расчеты проводились для следующих значений физико-механических характеристик материала: модуль упругости 1-го рода при комнатной температуре ($T = 20^\circ\text{C}$) $E = 1,9 \cdot 10^{11}$ Па; плотность – 8570 кг/м^3 ; коэффициент Пуассона – $0,3$.

На рис. 3 приведены частотные функции лопаточных венцов с Z-образными (а) и беззиговыми (б) бандажными полками с различными углами наклона α контактных поверхностей при $\omega = 0$ и $T = 20^\circ\text{C}$. Видно, что с увеличением угла наклона α собственные частоты рассматриваемых лопаточных венцов возрастают. Это объясняется тем, что, как показано в [9], жесткость связи лопаток возрастает с увеличением угла наклона α . Также эти выводы хорошо согласуются с результатами, представленными в [10].

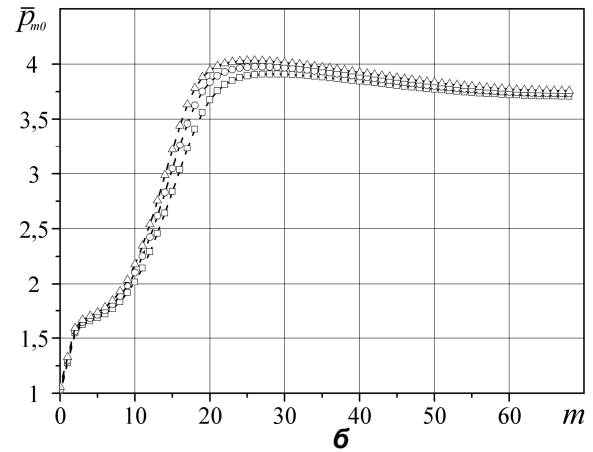
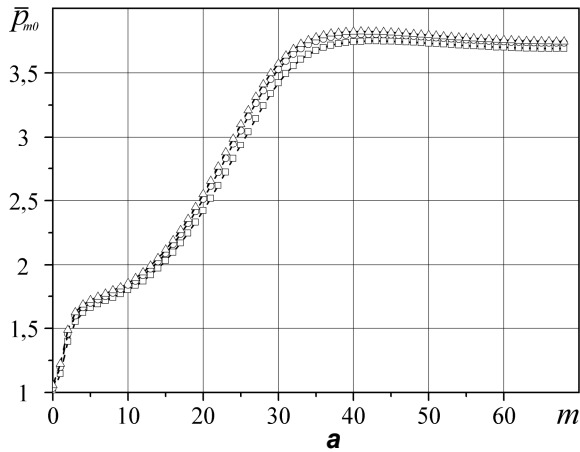
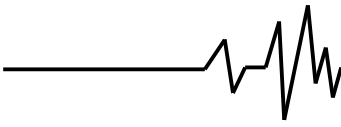


Рис. 3. Частотные функции лопаточных венцов с Z-образными (а) и беззиговыми (б) бандажными полками при угле наклона α контактных поверхностей, равном 45° (\square); 55° (\circ) и 65° (Δ)

Для анализа влияния температурно-силовых факторов на спектр собственных частот колебаний исследуемых лопаточных венцов были выбраны следующие параметры: скорость вращения рабочего колеса $\omega = 5850$ об/мин; температура газового потока $T = 905^\circ\text{C}$, которые характерны для режимов их эксплуатации [14]. Расчеты в данном случае выполнялись в предположении, что температура равномерно распределена по длине лопатки, а модуль упругости материала в этих условиях $E_T = 1,05 \cdot 10^{11}$ Па.

По данным выполненных исследований также были построены частотные функции венцов для выбранных значений угла наклона α , которые показаны на рис. 4. Из представленных результатов следует, что учет действия поля центробежных сил повышает

собственные частоты колебаний лопаточного венца во всем диапазоне изменения угла наклона α контактных поверхностей по сравнению с таковыми, полученными при $\omega = 0$. Однако температура эксплуатации обуславливает их снижение из-за уменьшения модуля упругости материала, хотя площадь контакта и максимальные значения контактных давлений возрастают, как и при учете скорости вращения рабочего колеса. Данные выводы хорошо иллюстрируются приведенной на рис. 5 диаграммой значений нормализованной частоты \bar{p}_{m0} рассматриваемых венцов, соответствующей их форме колебаний $m = 6$, для выбранных режимов работы двигателя при $\alpha = 55^\circ$.

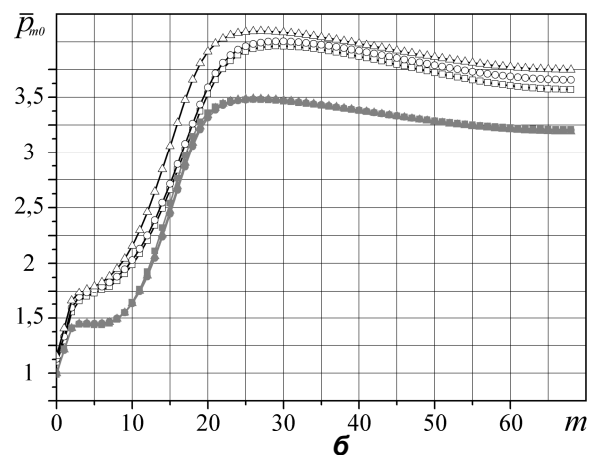
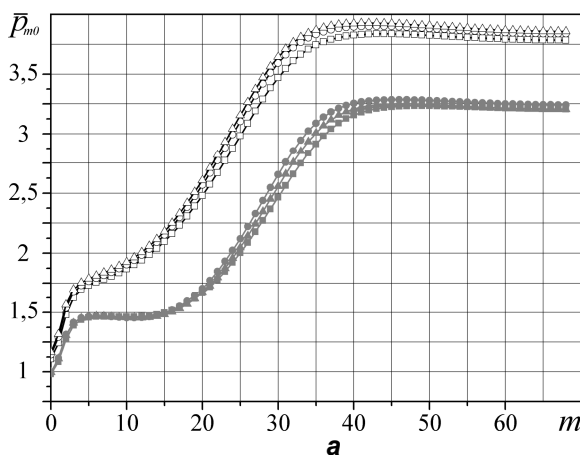


Рис. 4. Частотные функции лопаточных венцов с Z-образными (а) и беззиговыми (б) бандажными полками для $\alpha = 45^\circ$ (\square); 55° (\circ) и 65° (Δ) при $\omega = 5850$ об/мин, $T = 20^\circ\text{C}$; $\alpha = 45^\circ$ (\blacksquare); 55° (\bullet) и 65° (\blacktriangle) при $\omega = 5850$ об/мин, $T = 905^\circ\text{C}$

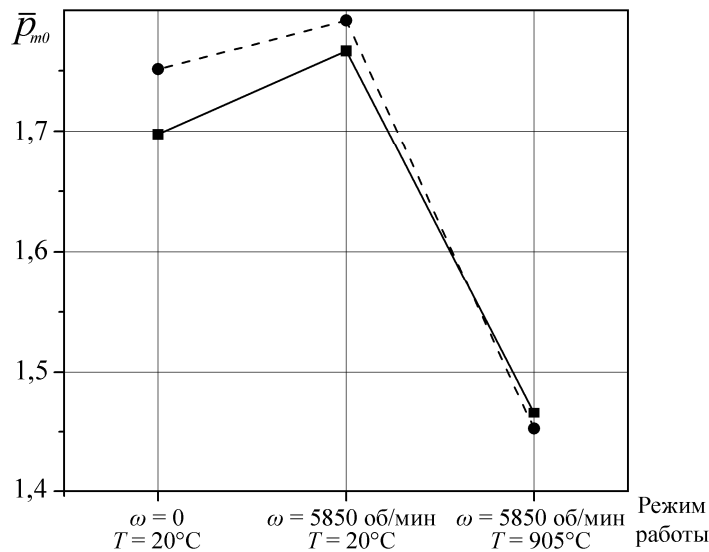
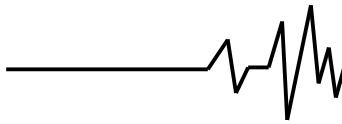


Рис. 5. Диаграмма значений нормализованной частоты \bar{P}_{m0} , соответствующей форме колебаний $m = 6$ венцов с Z-образными (сплошная линия) и беззиговыми (штриховая) бандажными полками при угле наклона их контактных поверхностей $\alpha = 55^\circ$

Выводы. На основании выполненных вычислительных экспериментов по определению влияния угла наклона контактных поверхностей различных типов бандажных полок к плоскости вращения рабочего колеса на спектр собственных колебаний лопаточных венцов установлено:

– увеличение угла наклона контактных поверхностей приводит к росту собственных частот колебаний венцов независимо от типа бандажной полки и величин характеристик температурно-силовых факторов;

– возрастание скорости вращения рабочего колеса приводит к повышению, а температуры – снижению собственных частот колебаний лопаточных венцов во всем диапазоне изменения угла наклона контактных поверхностей бандажных полок. При этом характер распределения частотных функций исследуемых лопаточных венцов не изменяется.

Список использованных источников

1. Sokolowski J. Frequencies and modes of rotating flexible shrouded bladed discs-shaft assemblies / J. Sokolowski, R. Rzakowski, L. Kwapisz // TASK Quarterly. – 2003. – Vol. 7, № 2. – P. 215–231.

2. Воробьев Ю. С. Колебания бандажированного рабочего колеса ГТД / Ю. С. Воробьев, К. Ю. Дьяконенко, В. Н. Романенко и

др. // Авиационно-космическая техника и технология. – 2006. – № 8 (34). – С. 87–90.

3. Herzog A. Nonlinear vibrations with friction: a multiharmonic approach / A. Herzog, L. Panning // Proceedings in Applied Mathematics and Mechanics. – 2010. – Vol. 10, № 1. – P. 245–246.

4. Krishna T.S.S.R. 3D modeling and dynamic characterization of steam turbine packet blade and cyclic symmetric analysis / T.S.S.R. Krishna, Lakshmana Kishore. T. // Int. J. of Research in Engineering and Technology. – 2012. – Vol. 01, № 03. – P. 460–464.

5. Меркулов В. М. Разработка бандажированных рабочих лопаток турбин с учетом требований надежности и технологичности / В. М. Меркулов, Ф. Д. Ильющенко // Авиационно-космическая техника и технология. – 2006. – № 9 (35). – С. 86–89.

6. Меркулов В. М. О выборе способа бандажирования рабочих лопаток турбин ГТД / В. М. Меркулов, Ф. Д. Ильющенко // Вестник двигателестроения. – 2005. – № 2. – С. 114–117.

7. Меркулов В. М. О влиянии параметров бандажирования на надежность и ресурс рабочих лопаток турбин / В. М. Меркулов, Ю. В. Якушев, Н. Н. Федорченко, А. П. Зинковский // Авиационно-космическая техника и технология. – 2009. – № 10 (67). – С. 167–171.

8. Zinkovskii A. P. Effect of identity violations of contact interaction between shrouds



on the static and dynamic stress state characteristics of blade rings / A. P. Zinkovskii, Ya. D. Kruglii // *Strength of Materials*. – 2012. – Vol. 44, № 2. – P. 144–150.

9. Savchenko K. V. Influence of the orientation of shroud contact surfaces on the static stress state of turbine rotor blades / K. V. Savchenko, A. P. Zinkovskii, I. G. Tokar', Ya. D. Kruglii // *Strength of Materials*. – 2014. – Vol. 46, № 4. – P. 493–502.

10. Иванов В. П. Колебания рабочих колес турбомашин / В. П. Иванов. – М.: Машиностроение, 1983. – 224 с.

11. Придорожный Р. П. Оценка напряженного состояния замковых соединений рабочих лопаток турбин с учетом возможных отклонений их размеров / Р. П. Придорожный, А. В. Шереметьев, А. П. Зиньковский и др. // *Авиационно-космическая техника и технология*. – 2007. – № 8. – С. 81–85.

12. Жовдак В. А. Влияние контактного взаимодействия в замковом соединении на собственные колебания лопаток / В. А. Жовдак, А. А. Дегтев, А. Ф. Кабанов, А. С. Степченко // *Проблемы машиностроения*. – 2003. – 6, № 4. – С. 52–60.

13. Савченко К. В. Влияние ориентации контактных поверхностей беззиговых бандажных полок на результаты расчета собственных частот колебаний лопаточного венца / К. В. Савченко, А. П. Зиньковский, Я. Д. Круглий // *Вібрації в техніці і технологіях*. – 2014. – № 4 (76). – С. 80–84

14. Меркулов В. М. К выбору параметров бандажной связи рабочих лопаток турбин с беззиговыми полками / В. М. Меркулов, С. С. Трипольский, Ю. В. Якушев // *Авиационно-космическая техника и технология*. – 2007. – Вип. 9(45). – С. 48–51.

Список источников в транслитерации

1. Sokolowski J. Frequencies and modes of rotating flexible shrouded bladed discs-shaft assemblies / J. Sokolowski, R. Rzakowski, L. Kwapisz // *TASK Quarterly*. – 2003. – Vol. 7, № 2. – P. 215–231.

2. Vorobev Yu. S. Kolebaniya bandazhirovannogo rabocheho koleasa GTD / Yu. S. Vorobev, K. Yu. Dyakonenko, V. N. Romanenko i dr. // *Авиационно-космическая техника и технология*. – 2006. – № 8 (34). – С. 87–90.

3. Herzog A. Nonlinear vibrations with friction: a multiharmonic approach / A. Herzog, L. Panning // *Proceedings in Applied Mathematics and Mechanics*. – 2010. – Vol. 10, №. 1. – P. 245–246.

4. Krishna T.S.S.R. 3D modeling and dynamic charectarization of steam turbine packet blade and cyclic symmetric analysis / T.S.S.R. Krishna, Lakshmana Kishore. T. // *Int. J. of Research in Engineering and Technology*. – 2012. – Vol. 01, № 03. – P. 460–464.

5. Merkulov V. M. Razrabotka bandazhirovannykh rabochikh lopatok turbin s uchetom trebovaniy nadezhnosti i tekhnologichnosti / V. M. Merkulov, F. D. Ilyuschenko // *Авиационно-космическая техника и технология*. – 2006. – № 9 (35). – С. 86–89.

6. Merkulov V. M. O vybore sposoba bandazhirovaniya rabochikh lopatok turbin GTD / V. M. Merkulov, F. D. Ilyuschenko // *Vestnik dvigatelestroeniya*. – 2005. – № 2. – С. 114–117.

7. Merkulov V. M. O vliyanii parametrov bandazhirovaniya na nadezhnost i resurs rabochikh lopatok turbin / V. M. Merkulov, Yu. V. Yakushev, N. N. Fedorchenko, A. P. Zinkovskiy // *Авиационно-космическая техника и технология*. – 2009. – № 10 (67). – С. 167–171.

8. Zinkovskii A. P. Effect of identity violations of contact interaction between shrouds on the static and dynamic stress state characteristics of blade rings / A. P. Zinkovskii, Ya. D. Kruglii // *Strength of Materials*. – 2012. – Vol. 44, № 2. – P. 144–150.

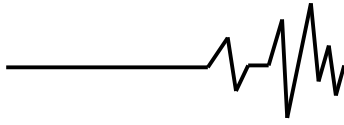
9. Savchenko K. V. Influence of the orientation of shroud contact surfaces on the static stress state of turbine rotor blades / K. V. Savchenko, A. P. Zinkovskii, I. G. Tokar', Ya. D. Kruglii // *Strength of Materials*. – 2014. – Vol. 46, № 4. – P. 493–502.

10. Ivanov V. P. Kolebaniya rabochikh koles turbomashin / V. P. Ivanov. – М.: Mashinostroenie, 1983. – 224 s.

11. Pridorozhnyy R. P. Otsenka napryazhennogo sostoyaniya zamkovykh soedineniy rabochikh lopatok turbin s uchetom vozmozhnykh otkloneniy ih razmerov / R. P. Pridorozhnyy, A. V. Sheremetev, A. P. Zinkovskiy i dr. // *Авиационно-космическая техника и технология*. – 2007. – № 8 (44). – С. 81–85.

12. Zhovdak V. A. Vliyanie kontaktnogo vzaimodeystviya v zamkovom soedinenii na sobstvennye kolebaniya lopatok / V. A. Zhovdak, A. A. Degtev, A. F. Kabanov, A. S. Stepchenko // *Problemy mashinostroeniya*. – 2003. – 6, № 4. – С. 52–60.

13. Savchenko K. V. Vliyanie orientatsii kontaktnykh poverhnostey bezzigovykh bandazhnykh polok na rezultaty rascheta sobstvennykh chastot kolebaniy lopatochnogo ventsa / K. V. Savchenko, A. P. Zinkovskiy, Ya. D. Kruglii // *Vibracii v tekhnitsi i tekhnologiiiah*. – 2014. – № 4 (76). – С. 80–84.



14. Merkulov V. M. K vyboru parametrov bandazhnoy svyazi rabochikh lopatok turbin s bezzigovymi polkami / V. M. Merkulov, S. S. Tripolskiy, Yu. V. Yakushev // Aviatsionno-kosmicheskaya tekhnika i tekhnologiya. – 2007. – № 9 (45). – S. 48–51.

ВПЛИВ УМОВ СПРЯЖЕННЯ БАНДАЖНИХ ПОЛИЦЬ НА СПЕКТР ВЛАСНИХ ЧАСТОТ КОЛИВАНЬ ЛОПАТКОВОГО ВІНЦЯ

Анотація. Наведено результати обчислювальних експериментів з визначення закономірностей впливу орієнтації контактних поверхонь полиць на спектр власних частот коливань лопаткового вінця з урахуванням дії поля відцентрових сил і температури газового потоку.

Ключові слова: турбінна лопатка, бандажний зв'язок, орієнтація контактних поверхонь, власні частоти коливань.

INFLUENCE OF CONDITIONS OF SHROUD COUPLING ON THE SPECTRUM OF NATURAL FREQUENCIES OF BLADE ASSEMBLY VIBRATIONS

Annotation. The paper presents the results of computational experiments on determination of the regularities of the influence of orientation of the shroud contact surfaces on the spectrum of natural frequencies of blade assembly vibrations considering the action of centrifugal gravity forces and gas flow temperature.

Key words: turbine blade, shroud coupling, orientation of the contact surfaces, natural frequencies of vibrations.