

МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ ОЦЕНКИ ЭФФЕКТИВНОСТИ КОЛЬЦЕВЫХ ДЕМПФЕРОВ В БЛИСКАХ ГТД

© 2012 М. Ш. Нихамкин, А. А. Балакирев, Л. В. Воронов

Пермский национальный исследовательский политехнический университет

Описана основанная на методе сканирующей лазерной виброметрии методика экспериментальной оценки эффективности применения кольцевых демпферов в блисках компрессора газотурбинного двигателя. Исследованы четыре типа демпферов, представляющие собой разрезные кольца различных размеров. Показано, что применение кольцевых демпферов может увеличить эффективность демпфирования более, чем в 20 раз.

Газотурбинные двигатели, блиски, демпфирование колебаний.

Конструкция газотурбинных двигателей нового поколения предусматривает использование в роторах компрессоров и турбин моноколес (блисков) - рабочих колёс, в которых лопатки выполнены с диском за одно целое [1-3]. Это позволяет добиться снижения массы конструкции на 25%, понизить трудоёмкость ее изготовления.

Разработка блисков требует комплексного решения проблем обеспечения усталостной прочности, исключения опасных вибраций. Сложность этой проблемы применительно к блискам определяется отсутствием замковых соединений лопаток с диском и, как следствие, - низким уровнем демпфирования колебаний [2,4]. Особенно остро эта проблема проявляется в блисках компрессора из-за низкого внутреннего трения в титановых сплавах.

Одним из эффективных способов конструкционного демпфирования блисков является [5,6] использование кольцевых демпферов сухого трения, устанавливаемых на внутренней поверхности блиска (рис. 1). Разрезное кольцо устанавливается в специальную канавку на внутренней поверхности обода блиска с небольшим натягом. При вращении рабочего колеса разрезное кольцо под действием центробежных сил прижимается к поверхности канавки обода блиска. Возникающие в контакте кольцо – блиск силы трения обеспечивают демпфирующий эффект.

Эффективность демпфирования колебаний блисков при применении кольцевых демпферов зависит от конструктивного исполнения демпфирующего устройства, мате-

риала, площади контакта кольца и блиска, усилия в контакте, реализующихся форм и частот колебаний блиска и кольцевого демпфера.

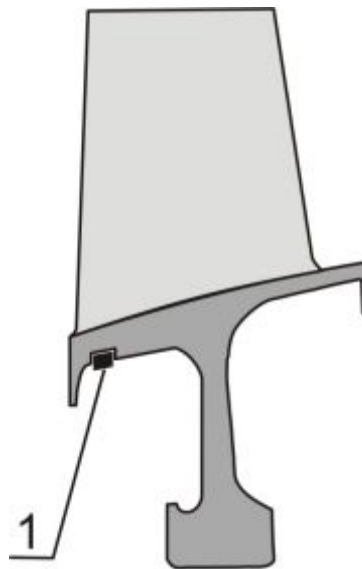


Рис.1. Блиск с кольцевым демпфером [1]

В работах [5,6] показано, что существует оптимальная масса кольцевого демпфера, при которой логарифмический декремент колебаний системы блиск – демпфер максимален. Полученные результаты имеют частный характер, подтвержденные экспериментальными исследованиями методики расчёта демпферов для блисков не разработаны.

Традиционная методика прочностной доводки рабочих колёс подразумевает проведение дорогостоящих натурных испытаний на специальных разгонных стендах [6,7] или в составе двигателя. В этих условиях наиболее полно воспроизводятся действующие

щие силовые и тепловые факторы, однако информация о поведении рабочих колёс ограничена ёмкостью токосъёмников в системе измерений.

В [8-10] описан опыт применения сканирующей лазерной виброметрии для экспериментального исследования вибраций лопаток и рабочих колёс, который показывает достоинства метода, в первую очередь возможность бесконтактного измерения параметров вибраций в большом количестве точек.

Целью исследования, описанного в настоящей работе, является отработка метода сканирующей лазерной виброметрии для экспериментального анализа механизмов и закономерностей функционирования кольцевых демпферов, количественной оценки их эффективности.

Для количественной оценки эффективности демпфера используется логарифмический декремент колебаний δ или коэффициент относительного демпфирования $\zeta \approx \delta/2\pi$. Последний определяется по амплитудно-частотной характеристике по ширине частотной полосы на резонансном режиме при -3 дБ от значения локального максимума, по формуле:

$$\zeta = \frac{\omega_2 - \omega_1}{2 \cdot p}, \quad (1)$$

где ω_2 и ω_1 – правая и левая границы частотной полосы амплитудно-частотной характеристики на резонансном режиме при -3 дБ от значения максимума, p – резонансная частота.

В качестве объекта исследования в настоящей работе используется модельный блиск (рис. 2). Он представляет собой пластину, состоящую из дискового участка и радиальных элементов постоянной ширины, имитирующих лопатки. На внутренней поверхности с натягом, моделирующим действие центробежных сил, устанавливается один из демпферов в форме разрезного кольца (рис. 3). Демпферы №1 и 2 различаются шириной и внутренним диаметром; демпфер №3 состоит из двух тонких колец, соприкасающихся между собой по торцовым поверхностям: в демпфере №4 эти кольца дополнительно сжаты между собой с помощью четырёх плоских пружин.

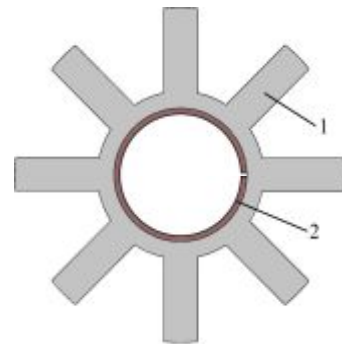


Рис. 2. Модельный блиск: 1 – блиск, 2 – демпфер

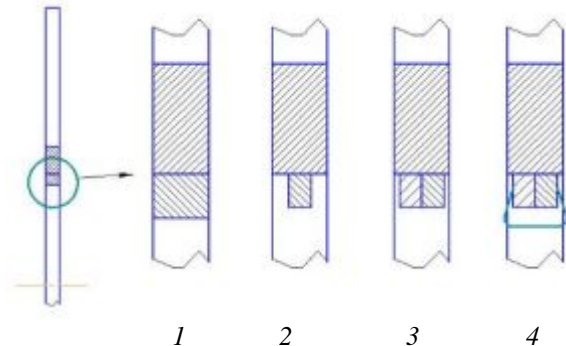


Рис. 3. Исследованные демпферы:
1...4 – тип демпфера

Центробежная нагрузка, действующая на демпфер в процессе работы, моделируется давлением q , которое создаётся при установке демпфера в центральное отверстие блиска с натягом (рис.4). Давление q контролируется усилием P , которое необходимо приложить к краям разреза при установке демпфера в блиск. Это усилие для каждого типа демпферов было предварительно рассчитано методом конечных элементов из решения контактной задачи теории упругости.

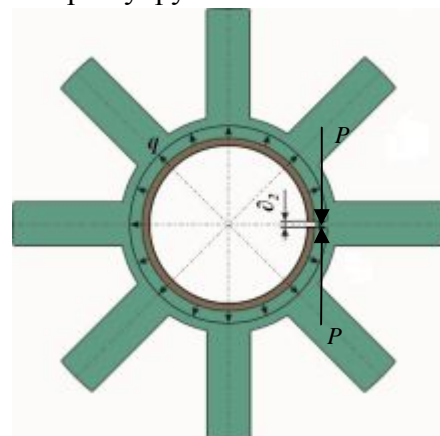


Рис. 4. К методике моделирования центробежной нагрузки, действующей на демпфер

Методика экспериментальной оценки демпфирующих свойств кольцевых демпферов основана на использовании метода трёхкомпонентной сканирующей лазерной виб-

рометрии (рис. 5). На поверхность объекта наносится сетка сканирования с шагом 7-10мм. Блиск крепится в податливом подвесе, при этом реализуются условия, близкие к свободному состоянию, что упрощает процедуру задания граничных условий при расчётном анализе.

Возбуждение колебаний осуществляется от встроенного генератора бесконтактно при помощи акустического возбудителя. В проводимых исследованиях использован сигнал возбуждения с возрастающей частотой и постоянной амплитудой. Реакция системы блиск – демпфер в виде виброскоростей измеряется последовательно по всем точкам сетки сканирования. Результатом измерений является амплитудно-частотная характеристика (АЧХ) блиска с демпфером, осреднённая по всем точкам сканирования. Эта характеристика используется для определения собственных частот по пикам на АЧХ и коэффициента относительного демпфирования ζ . Собственные формы колебаний определяются путем анализа анимационных картин динамического поведения блиска-имитатора.

Проведены шесть серий экспериментов:

- 4 эксперимента с блиском без демпфера, диапазон частот до 5000 Гц, разрешение по частоте 1 Гц;
- 9 экспериментов с блиском без демпфера, диапазон частот до 800 Гц, разрешение по частоте 0,125 Гц;
- 4 серии по 3 эксперимента с блиском с демпферами различных типов, диапазон частот до 800 Гц, разрешение по частоте 0,125 Гц.

В первой серии экспериментов в диапазоне частот до 5000 Гц обнаружено 10 собственных частот.

На рис.6 показаны полученные во второй серии из 9 экспериментов осреднённые по ансамблю точек сканирования АЧХ модельного блиска без демпфера. В диапазоне до 800 Гц имеются три собственные частоты и формы колебаний: с двумя узловыми диаметрами (395 Гц), зонтичная (711 Гц), с тремя узловыми диаметрами (757 Гц)

На рис.7 показаны осреднённые амплитудно-частотные характеристики блиска без демпфера в области низшей собственной частоты. В области резонанса на АЧХ видно «расслоение» пиков, которое может быть следствием наличия кратных форм, различающихся поворотом узловых диаметров.

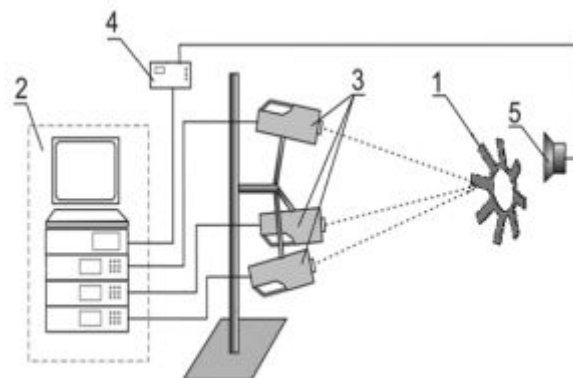


Рис. 5. Схема экспериментальной установки: 1 – объект исследования; 2 – система управления лазерным виброметром; 3 – сканирующие лазерные головки; 4 – усилитель; 5 – акустический возбудитель

На рис.7 видна хорошая воспроизводимость АЧХ в области резонанса. Коэффициент вариации по собственной частоте составил 0,01%. Рассеяние коэффициентов относительного демпфирования значительно выше: коэффициент вариации в этой серии из 9 экспериментов составил 65,9%, его высокое значение является следствием малости абсолютных значений измеряемой величины (менее 0.005%).

На рис.8 приведены АЧХ модельного блиска без демпфера и с демпферами показанных на рис.3 конструкций. Показана область низшей собственной частоты. Видно, что установка демпфера приводит к некоторому (до 7,7%) увеличению собственной частоты вследствие увеличения жёсткости системы.

Для демпферов типа 1 и 3 на АЧХ отчетливо видно расслоение пиков вблизи резонансной частоты. Двум близлежащим пикам соответствуют кратные формы колебаний, различающиеся поворотом узловых диаметров на угол 45°. Такое «расслоение» можно объяснить нарушением симметрии, которое вносит в систему разрезное кольцо. Этот эффект проявляется сильнее в случае более жёсткого демпфера.

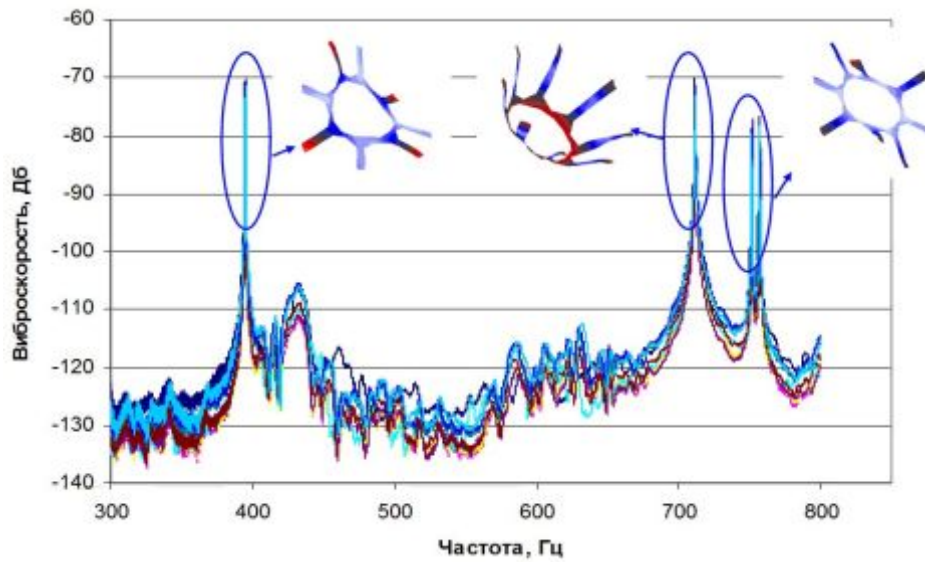


Рис. 6. Амплитудно-частотная характеристика модельного блиска без демпфера (вторая серия из 9 экспериментов)

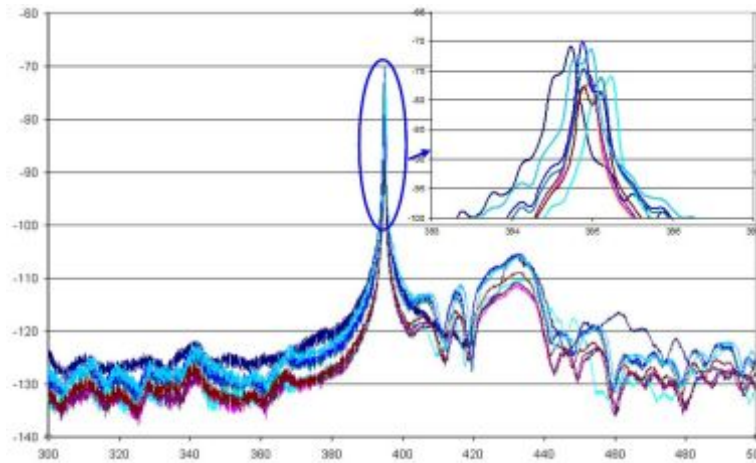


Рис. 7. Амплитудно-частотная характеристика модельного блиска без демпфера в области низшей собственной частоты (вторая серия из 9 экспериментов)

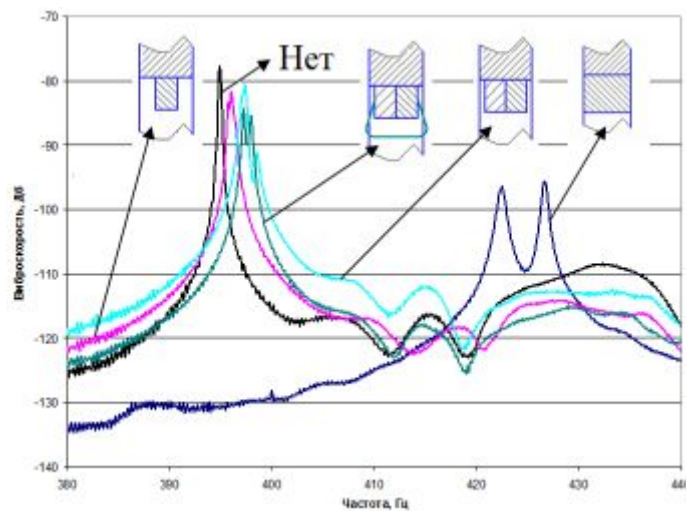


Рис. 8. Амплитудно-частотные характеристики модельного блиска без демпфера и с демпферами различных типов

Полученные для низшей собственной формы колебаний значения логарифмического декремента колебаний δ приведены в табл. 1. Применение всех типов демпферов существенно (в 8...22 раза) увеличивает логарифмический декремент колебаний по сравнению с недемпфированным блиском.

Таблица 1. Логарифмические декременты колебаний системы блиск – демпфер

| Тип демпфера | Количество экспериментов | δ , % | |
|----------------|--------------------------|--------------|--------------------|
| | | Средний | Коеф-т вариации, % |
| Без демпфера | 9 | 0,025 | 65,9 |
| С демпфером №1 | 3 | 0,55 | 1,3 |
| С демпфером №2 | 3 | 0,23 | 16,3 |
| С демпфером №3 | 3 | 0,22 | 2,7 |
| С демпфером №4 | 3 | 0,21 | 24,7 |

Наибольшее увеличение (в 22 раза) характеристик демпфирования получено при применении демпфера №1, имеющего максимальную площадь контакта с блиском и наибольшую жёсткость.

Библиографический список

1. Ножницкий, Ю. А. Разработка критических технологий для обеспечения и подтверждения конкурентоспособных надежности и ресурса деталей перспективных газотурбинных двигателей различного назначения / Ю.А. Ножницкий // Материалы совещания «Перспективные направления создания научно-технического задела ФГУП «ЦИАМ» в области гражданского авиастроения. - 2012. - 33 с. <http://www.aviatp.ru/docs/detail.php?ID=507>.

2. Иноземцев, А.А. О программе создания авиационных газотурбинных двигателей пятого поколения для семейства самолетов МС-21 [Текст] / А.А. Иноземцев // Вестн. Пермского науч. центра УрО РАН. – 2010. - №4. - С.28-47.

3. Павлинич, С. П. Методы разработки базовых, высоких и критических технологий в авиадвигателестроении [Текст]/. С. П. Павлинич // Вестн. УГАТУ. - Т. 10. - № 1 (26). - С. 74–81.

4. Ганиев, Р.Ф. Флаттер с предельным циклом колебаний лопаток ротора турбокомпрессора [Текст] / Р.Ф. Ганиев, О.Б. Балакшин, Б.Г. Кухаренко // Докл. академии наук. – 2012. - Т. 446. - № 2. - С. 159–161.

5. Laxalde D, Thouverez F, Lombard J-P. Vibration control for integrally bladed disks using friction ring dampers, ASME Turbo Expo 2007, Montreal, Canada. GT 2007-27087.

6. Laxalde D, Thouverez F, Gibert C. Experimental and numerical investigations of friction rings damping of blisks, ASME Turbo Expo 2008, Berlin, Germany. GT 2008-50862.

7. Исследования вибрационной прочности вращающихся лопаток турбомашин на динамическом разгонном стенде [Текст] / Ю.А. Ножницкий, Ю.А. Федина, Д.В. Шадрин [и др.] // Вестн. УГАТУ. – 2011. Т.15. - №4 (44). - С.86-89.

8. Experimental Investigation of Mistuned Bladed Disk Vibration [Text] / C. Pierre, S.L. Ceccio, J. Judge [et al.] // Proceedings of the 5th National Turbine Engine High Cycle Fatigue Conference, Chandler, Arizona, March 2000.

9. Методика экспериментального модельного анализа лопаток и рабочих колёс газотурбинных двигателей [Текст] / А.А. Иноземцев, М.Ш. Нихамкин, Л.В. Воронов [и др.] // Тяжёлое машиностроение. – 2010. - № 11. - С. 2-6.

10. Экспериментальный и расчетный модельный анализ лопаток вентиляторов полый конструкции [Текст] / А.А. Иноземцев, М.Ш. Нихамкин, Л.В. Воронов [и др.] // Авиационная промышленность, - 2010. -№3. - С.8-11.

AN EXPERIMENTAL TECHNIQUE FOR EFFICIENCY ASSESSMENT OF RING DAMPERS FOR GAS TURBINE ENGINE BLISK

© 2012 M. S. Nikhamkin, A. A. Balakirev, L. V. Voronov

Perm National Research Polytechnic University

An experimental technique is developed to estimate efficiency of ring dampers for gas turbine engine blisk using the scanning laser vibrometry method. Four damper types based on split friction rings with different sizes are studied. It is shown that ring dampers increase damping efficiency up to 20 times.

Gas turbin engines, blisk, vibration damping.

Информация об авторах

Нихамкин Михаил Шмерович, доктор технических наук, профессор, заместитель заведующего кафедрой «Авиационные двигатели», Пермский национальный исследовательский политехнический университет. E-mail: Nikhamkin@mail.ru. Область научных интересов: динамика авиационных ГТД, исследования колебаний сложных систем, повреждение деталей ГТД при попадании посторонних предметов.

Балакирев Александр Андреевич, аспирант, научный сотрудник кафедры «Авиационные двигатели», Пермский национальный исследовательский политехнический университет. E-mail: 1st.LeoNao@gmail.com. Область научных интересов: динамика авиационных ГТД.

Воронов Леонид Васильевич, кандидат технических наук, доцент кафедры «Авиационные двигатели», Пермский национальный исследовательский политехнический университет. Область научных интересов: динамика авиационных ГТД, повреждение деталей ГТД при попадании посторонних предметов.

Nikhamkin Mikhail Shmerovich, doctor of technical sciences, Professor at Aircraft Engine Department in Perm National Research Polytechnic University. E-mail: Nikhamkin@mail.ru. Area of research: Dynamics of gas-turbine aircraft engines, High complexity systems vibrations, Foreign object damaging of aircraft engine.

Balakirev Alexander Andreevich, a postgraduate student, Junior research assistant at Aircraft Engine Department in Perm National Research Polytechnic University. E-mail: 1st.LeoNao@gmail.com. Area of research: Dynamics of gas-turbine aircraft engines.

Voronov Leonid Vasilievich, candidate of technical sciences, Associate Professor of Aircraft Engine Department in Perm National Research Polytechnic University. Area of research: Dynamics of gas-turbine aircraft engines, foreign object damaging of aircraft engine.