

Спекл-интерферометрическая установка для исследования частот и форм колебаний рабочих колес турбомашин

© А.И. Жужукин, К.Г. Непеин

ПАО «ОДК — КУЗНЕЦОВ», Самара, 443009, Россия

В процессе эксплуатации лопатки и диски рабочих колес турбомашин подвергаются сильному вибрационному воздействию, поэтому для предотвращения резонансных разрушений этих деталей на стадии проектирования и доводки проводится отстройка от возможных резонансов. С этой целью предварительно определяют их собственные частоты и формы колебаний, причем во многих случаях приходится прибегать к экспериментальным методам исследования. Благодаря высокой информативности, панорамности, а также относительно низкой цене отдается предпочтение спекл-интерферометрическим методам. Представлена разработанная спекл-интерферометрическая установка, которая позволяет регистрировать формы колебаний диска и каждой лопатки, находящейся в составе колеса. Приведены формы колебаний рабочего колеса компрессора 5-й ступени. Выполнено сравнение частот и форм колебаний лопаток колеса с колебаниями одиночной изолированной лопатки. Полученные результаты могут быть использованы для анализа данных тензометрирования, исследования расстройки колебаний (mistuning) рабочего колеса, а также для верификации численной модели.

Ключевые слова: *виброметрия, собственная частота, формы колебаний рабочих колес, спекл-интерферометрия*

Введение. При разработке и доводке турбомашин одной из основных проблем является обеспечение вибрационной прочности рабочих колес компрессора и турбины как наиболее нагруженных и ответственных конструктивных элементов. Исследование вибрационных характеристик рабочих лопаток компрессора и турбины — важная задача, во многом определяющая эффективность доводки. Следует учитывать, что хотя набор частот и форм колебаний отдельных лопаток и является необходимой информацией, при объяснении процессов, происходящих в лопаточном аппарате, требуется также учитывать принадлежность лопатки к колесу. В противном случае будет сложно определить, по какой форме колебаний системы диск — лопатки реализуются максимальные напряжения в лопатках колеса [1]. Результаты численного расчета здесь в большинстве случаев недостаточно, так как в реальных рабочих колесах при их изготовлении всегда возникают малые различия лопаток, вызванные технологическими допусками на их изготовление, неоднородностью материала, разной посадкой в замках и т. д. Причем все эти отклонения носят случайный характер. Это приводит к нарушению циклической симметрии и,

в итоге, к расслоению спектра колебаний, что в значительной степени усложняет трактовку результатов тензометрирования.

Для экспериментального определения частот и форм колебаний рабочих колес турбомашин применяются разные методы, в которых используются различные принципы измерений. В работе [2] колебания лопаточного аппарата компрессора исследовались методом песчаных фигур. Однако он оказался малоэффективным для исследования колебаний рабочих колес с дисками, имеющими сложное поперечное сечение, а также в случае, когда лопатки в составе колеса имеют высокую степень закрутки. В работах [3–5] рассмотрены колебания рабочих колес компрессора и турбины с применением голографической интерферометрии. Этот метод значительно более информативен, чем приведенный ранее, но при проведении эксперимента требуется высокая виброизоляция. Кроме того, необходимость использования фотоматериалов с присущей им технологией фотохимической обработки затрудняет процесс оперативного контроля исследуемых объектов и его автоматизацию. Имеющиеся на мировом рынке лазерные виброметры PSVPolytec более эффективны [6–9], но они обладают высокой стоимостью.

В этих условиях большую практическую значимость приобрели панорамные оптические методы, прежде всего, методы цифровой спекл-интерферометрии [10–12], особенно в связи с разработкой алгоритма формирования спекл-интерферограмм в условиях нестабильности оптической схемы [13], а также оптических схем, обладающих повышенной помехоустойчивостью [14]. Цель работы — показать преимущества спекл-интерферометрии, позволяющей оперативно и бесконтактно получать информацию о распределении амплитуд колебаний по всей поверхности исследуемой детали.

Экспериментальная часть. Для исследования форм колебаний наиболее целесообразно использовать метод формирования спекл-интерферограмм путем вычитания изображений с помощью усреднения во времени [10].

В этом случае яркость наблюдаемой на экране монитора интерференционной картины определяется выражением [13]:

$$B = 4b \left[\langle I_S \rangle \langle I_O \rangle J_0^2 \left(\frac{4\pi A(x, y)}{\lambda} \right) \cos^2(\varphi_S - \varphi_O) \right]^{\frac{1}{2}}, \quad (1)$$

где b — коэффициент, зависящий от параметров системы ввода; $\langle I_S \rangle$, $\langle I_O \rangle$ — усредненная за время ввода яркость предметного и опорного пучков в точке (x, y) ; J_0 — функция Бесселя первого рода нулевого порядка; $A(x, y)$ — амплитуда колебаний поверхности

в точке (x, y) ; λ — длина волны лазерного излучения; φ_S, φ_O — фаза предметного и опорного пучков в точке (x, y) .

Информацию об амплитуде колебаний в каждой точке поверхности детали содержит член $J_0(4\pi A/\lambda)$.

Оптическая схема и методика исследования колебаний изолированных рабочих лопаток газотурбинных двигателей описаны в [15]. Некоторые формы колебаний лопатки 5-й ступени компрессора приведены на рис. 1.

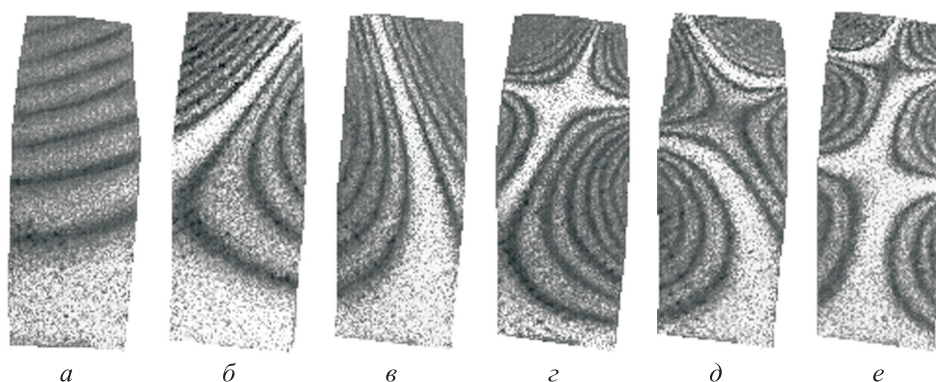


Рис. 1. Формы колебаний лопатки 5-й ступени компрессора на различных частотах: $a - e$ — 404; 1246; 1591; 2750; 3450; 4778 Гц соответственно

В узловых линиях $A = 0$. Следовательно, в этих точках $J_0(0) = 1$, и тогда выражение (1) принимает максимальное значение, поэтому на спекл-интерферограммах (см. рис. 1) узловые линии представляют собой наиболее яркие светлые полосы, что и позволяет оперативно определять форму колебаний исследуемой детали. Множества точек изображения, в которых функция Бесселя, описывающая форму резонансных колебаний объекта, принимает нулевое значение, являются линиями равных амплитуд. На спекл-изображении эти линии выглядят в виде темных полос. Величину амплитуды колебаний в точке объекта, принадлежащей каждой темной полосе, можно определить по номеру нуля функции $J_0(4\pi A/\lambda)$.

Вместе с тем использование спекл-интерферометрического метода для исследования колебаний крупногабаритных конструкций связано с преодолением экспериментальных трудностей. Проблема заключается в более сложной юстировке оптической схемы, а также в необходимости подбора параметров источника излучения и регистрирующей системы. В работе [16] описана спекл-интерферометрическая установка, позволяющая исследовать собственные частоты и формы колебаний рабочих колес турбомашин. Однако она не позволяет регистриро-

вать формы колебаний каждой конкретной лопатки, находящейся в составе колеса, что является крайне важным при анализе результатов тензометрирования.

Для более детального исследования колебаний рабочих колес турбомашин на ПАО «ОДК — Кузнецов» на основе оптической схемы интерферометра с разделенными ветвями и гладкой опорной волной разработана цифровая спекл-интерферометрическая установка, позволяющая получать информацию о колебаниях каждой лопатки колеса (рис. 2).

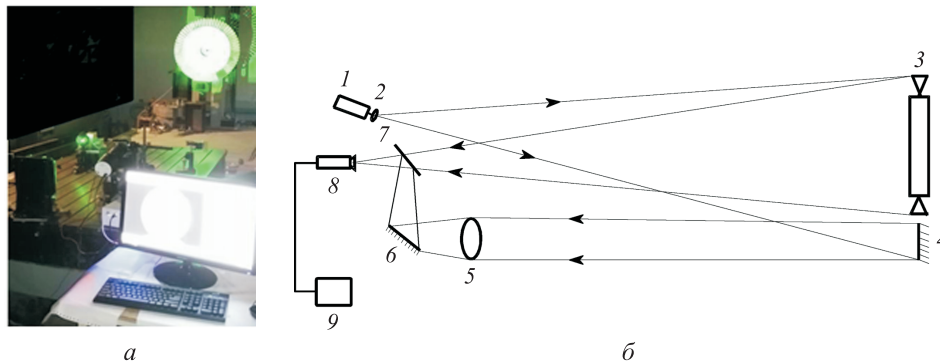


Рис. 2. Спекл-интерферометр для исследования колебаний рабочих колес турбомашин:

a — внешний вид; *б* — оптическая схема (1 — непрерывный лазер; 2 — расширительная линза; 3 — рабочее колесо; 4, 6 — поворотные зеркала; 5 — линза; 7 — плоскопараллельная пластина; 8 — телекамера; 9 — персональная ЭВМ)

При разработке оптической схемы интерферометра был применен принцип разделения пучка по волновому фронту, это обусловлено тем, что излучение используемого твердотельного лазера KLM-532-100-LN имеет горизонтальную поляризацию. Регистрацию спекл-изображений проводили видеокамерой ВИДЕОСКАН-Е2-11002. Исследуемым объектом являлось рабочее колесо компрессора 5-й ступени. Частоты и формы колебаний отдельной изолированной лопатки этого колеса приведены на рис. 1. Размер диаметра диска с лопатками составляет около 900 мм, высота лопаток — 120 мм.

Установка работает следующим образом. Луч света от лазера 1 расширяется линзой 2 и освещает одновременно исследуемый объект 3 и зеркало 4. Часть лазерного излучения, рассеянную диффузной поверхностью исследуемого объекта 3 (предметный пучок), принимает телекамера 8. Отраженная от зеркала 4 волна (опорный пучок), проходя через линзу 5, с помощью зеркала 6 и плоскопараллельной пластины 7 направляется на вход телекамеры 8, соединенной с персональной ЭВМ 9.

Оптическая схема и исследуемый объект размещены на голографической платформе (размерами 3×5 м и массой 14 т), находящейся на каучуковых подушках. Исследуемое колесо крепится восемью болтами через вал-бочку к специально изготовленной установочной плите. Установочная плита с колесом с помощью четырех болтов притягивалась к силовой раме, прикрепленной к плите голографического интерферометра. Возбуждение колебаний колеса в осевом направлении до частоты 3500 Гц осуществлялось электродинамическим вибратором, а свыше этого значения — пьезошейкером.

Полученные спекл-интерферограммы колеблющегося на различных частотах полноразмерного колеса представлены на рис. 3. Для каждой формы приведен увеличенный фрагмент из шести лопаток нижней части этого колеса.

На показанных примерах (см. рис. 3) видно, что разработанная установка позволяет регистрировать с высоким разрешением формы колебаний рабочего колеса компрессора и получать информацию о форме колебаний каждой лопатки, а если необходимо, то и об амплитуде колебаний. Методика получения поля перемещений по всей поверхности лопатки с помощью спекл-интерферограммы описана в работе [17].

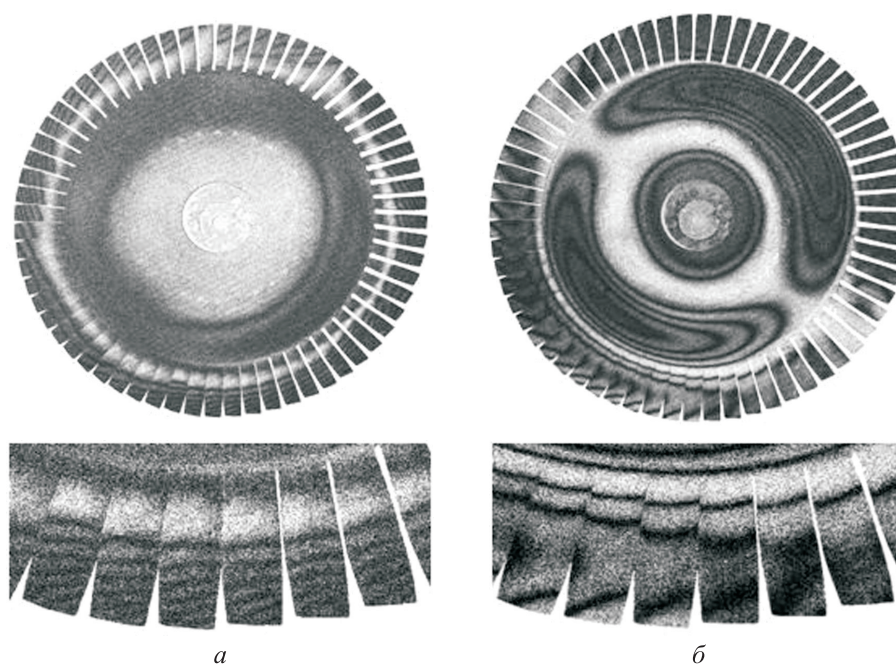


Рис. 3 (начало). Формы колебаний колеса компрессора 5-й ступени на различных частотах:

a, б — 380; 639 Гц соответственно

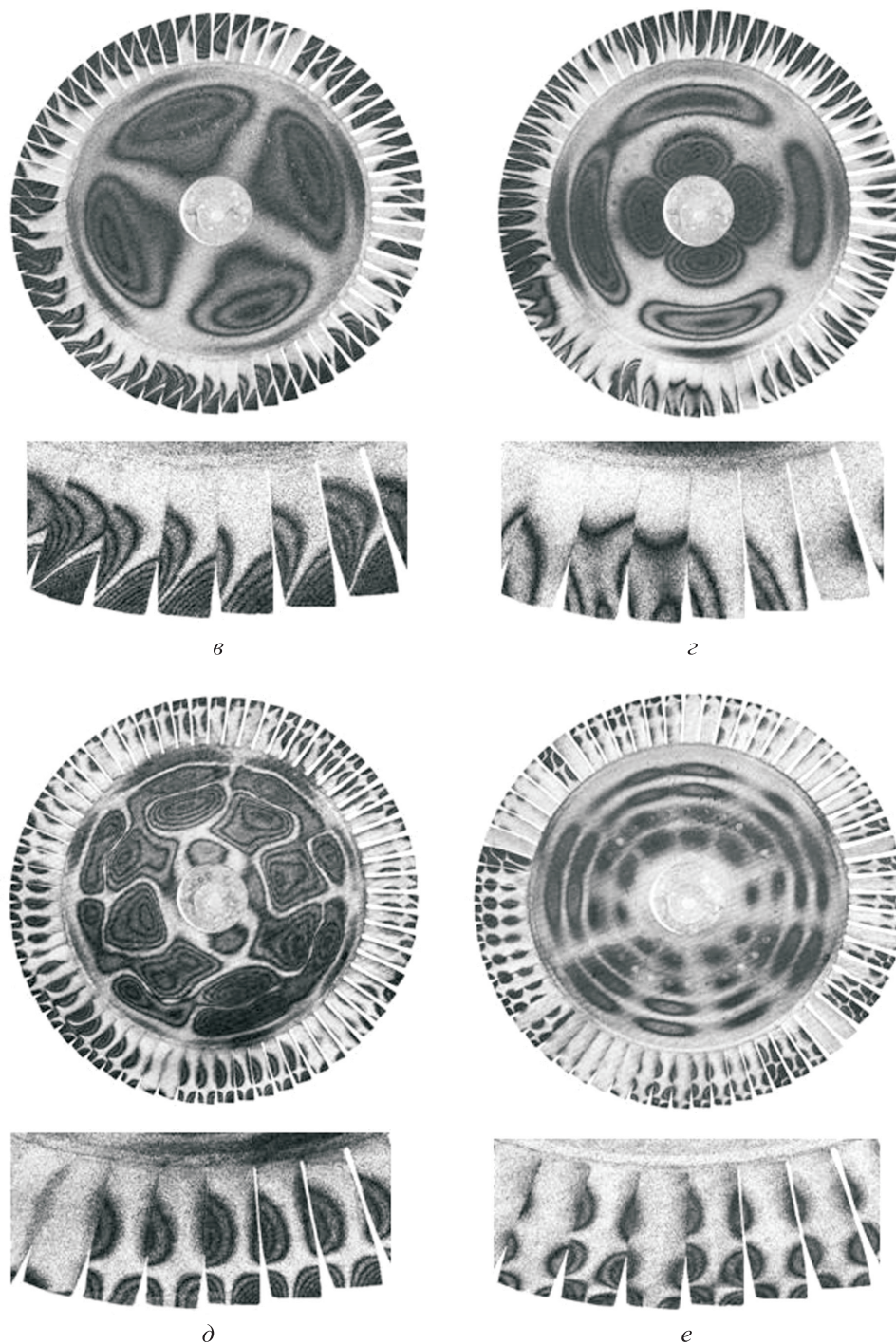


Рис. 3 (окончание). Формы колебаний колеса компрессора 5-й ступени на различных частотах:

а–г —1254; 1584; 3074; 4970 Гц соответственно

Обсуждение результатов. Колебания колеса, показанные на рис. 3, *а*, относятся к семейству диаметральных форм. Лопатки в этом случае колеблются по первой изгибной форме (см. рис. 1, *а*). Формы колебаний колеса, представленные на рис. 3, *б* и *в*, имеют, кроме диаметров, еще одну окружность, и лопатки колеблются соответственно по форме, показанной на рис. 1, *б*. На спекл-интерферограмме, показанной на рис. 3, *г*, колесо колеблется по форме с двумя узловыми окружностями, а лопатки совершают такие же крутильные колебания, как и изолированная лопатка на рис. 1, *в*. Можно найти соответствие форм колебаний лопаток, показанных на рис. 3, *д* и рис. 1, *г*, а также на рис. 3, *е* и рис. 1, *е*. Не во всех приведенных примерах при одной и той же форме колебаний значения резонансной частоты изолированной лопатки выше, чем частота резонансных колебаний по той же форме аналогичной лопатки в системе диск — лопатки. Это связано с тем, что при сборке колеса лопатки контролируются только по основному тону, а остальные резонансные частоты у них могут несколько различаться. Кроме того, на всех формах, показанных на рис. 3, присутствуют признаки расстройки колебаний колеса, вызванные нарушением осевой симметрии диска, а также неидентичностью параметров лопаток.

Заключение. В настоящее время цифровые спекл-интерферометрические установки наряду со сканирующими лазерными виброметрами PSVPolytec являются наиболее эффективными средствами при исследовании форм колебаний рабочих колес турбомашин. Лазерные виброметры малодоступны из-за высокой цены, и их не выпускает отечественная промышленность. Цифровые спекл-интерферометрические установки позволяют успешно решать задачи экспериментального исследования колебаний рабочих колес с расстройкой параметров, причем стоимость таких установок более чем на порядок ниже. Возможности использования в оптической схеме спекл-интерферометра в качестве регистрирующей системы цифровых фотокамер, представленных в изобилии на отечественном рынке, помогает делать такие установки общедоступными [18].

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Иванов В.П. *Колебания рабочих колес турбомашин*. Москва, Машиностроение, 1983, 224 с.
- [2] Белоусов М.Г., Маношин О.Ф. Экспериментальные исследования спектра собственных форм и частот колебаний лопаток компрессоров вспомогательного авиадвигателя. *Научный Вестник МГТУ ГА*, 2018, т. 21, № 4, с. 60–72.
- [3] Макаева Р.Х., Каримов А.Х., Царева А.М. *Диагностика деталей и узлов турбомашин по их вибрационным характеристикам с применением голографической интерферометрии*. Казань. Изд-во Казан. гос. техн. ун-та, 2011, 242 с.

- [4] Селезнев В.Г., Павлов Ю.И., О.И. Ильинская О.И. Особенности анализа результатов стендовых испытаний рабочих колес турбомашин. *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение*, 2015, № 1, с. 93–100.
- [5] Селезнев В.Г., Головченко И.Ю. Голографическая интерферометрия и ротор-статорное взаимодействие при анализе колебаний рабочих колес турбомашин. *Динамика и виброакустика*, 2018, т. 4, № 3, с. 26–30.
- [6] Laxalde D.L., Thouverez F., Sinou J.-J., et al. Mistuning identification and model updating of an industrial blisk. *International Journal of Rotating Machinery*, vol. 2007. Hindawi Publishing Corp., Article ID 17289, 10 p.
- [7] Иноземцев А.А., Нихамкин М.Ш., Воронов Л.В., Сенкевич А.Б., Головкин А.Ю., Болотов Б.П. Методика экспериментального модального анализа лопаток и рабочих колес газотурбинных двигателей. *Тяжелое машиностроение*, 2010, № 11, с. 2–6.
- [8] Иголкин А.А., Сафин А.И., Макарьянц Г.М., Крючков А.Н., Шахматов Е.В. Бесконтактная регистрация и анализ вибрации изделий машиностроения с помощью трехкомпонентного лазерного виброметра. *Прикладная физика*, 2013, № 4, с. 49–53.
- [9] Рыжиков И.Н. Экспериментальные исследования расстройки параметров моделей рабочих колес газотурбинных двигателей. *Вестник ИрГТУ*, 2014, № 12 (95), с. 53–57.
- [10] Джоунс Р., Уайкс К. *Голографическая и спекл-интерферометрия*. Москва, Мир, 1986, 328 с.
- [11] Осипов М.Н., Щеглов Ю.Д. Оптоэлектронный спекл-интерферометр для определения полей перемещений. *Вестник Нижегородского университета*, 2011, № 4, ч. 4, с. 1672–1675.
- [12] Ткач М.Р., Золотой Ю.Г., Довгань Д.В. Определение форм собственных колебаний элементов ГТД в реальном времени методом электронной спекл-интерферометрии. *Авиационно-космическая техника и технология*, 2013, № 9 (95), с. 203–207.
- [13] Комаров С.Ю. *Помехоустойчивый цифровой спекл-интерферометр для виброметрии объектов на основе метода усреднения во времени. Дис. ... канд. техн. наук*. Самара, 2004, 234 с.
- [14] Жужукин А.И. Мобильный спекл-интерферометр для исследования форм колебаний вибрирующих объектов во внестеновых условиях. *Электронный журнал «Труды МАИ»*, 2011, № 47.
URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=26555>
- [15] Жужукин А.И. Применение спекл-интерферометрии для исследования вибраций и статических деформаций деталей энергетических установок. *Вестник СамГУ — Естественнонаучная серия*, 2013, № 9/2 (110), с. 80–86.
- [16] Жужукин А.И. Применение спекл-интерферометрии для исследования колебаний крупногабаритных конструкций газотурбинных двигателей. *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение*, 2017, № 3, с. 66–74.
DOI: 10.18698/0236-3941-2017-3-66-74
- [17] Щеглов Ю.Д. Обработка спекл-изображений с использованием псевдоинтерферограмм. *Вестник СГАУ им. академика С.П. Королёва*, 2012, № 3 (34), с. 125–132.
- [18] Жужукин А.И., Соляников В.А. Особенности применения цифровой фотокамеры в оптической схеме спекл-интерферометра для виброметрии газотурбинных двигателей. *Известия Самарского научного центра РАН*, 2013, т. 15, № 4, с. 192–195.

Статья поступила в редакцию 12.01.2022

Ссылку на эту статью просим оформлять следующим образом:

Жужукин А.И., Непеин К.Г. Спекл-интерферометрическая установка для исследования частот и форм колебаний рабочих колес турбомашин. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2022, вып. 4.

<http://dx.doi.org/10.18698/2308-6033-2022-4-2169>

Жужукин Анатолий Иванович — канд. тех. наук, инженер-конструктор конструкторского научно-исследовательского отделения ПАО «ОДК — Кузнецов». e-mail: kg.nerein@uec-kuznetsov.ru

Непеин Кирилл Геннадьевич — начальник конструкторского научно-исследовательского отделения ПАО «ОДК — Кузнецов». e-mail: kg.nerein@uec-kuznetsov.ru

Speckle interferometry setup for studying the frequencies and modes of vibrations of turbo-machine rotor wheels

© A.I. Zhuzhukin, K.G. Nepein

JSC Kuznetsov, Samara, 443009, Russia

During operation, the blades and disks of the turbo-machine rotor wheels suffer severe vibrations. To prevent resonant destruction of these parts, detuning from potential resonances is performed at the design and development stages. In order to do this, the natural frequencies and vibration modes are preliminarily determined, and it is often necessary to use experimental research methods. Speckle interferometry methods are preferred due to their high information content, panoramic view provided, and relatively low cost. Within the research, we developed a speckle interferometry setup, which makes it possible to record the modes of vibration of the disk and each blade of the rotor wheel assembly. The study describes the modes of vibrations of the compressor 5-stage rotor wheel and compares the frequencies and modes of vibrations of the blades in the wheel with the vibrations of a single isolated blade. The results obtained with this setup can be used to analyze strain gauge data, study mistuning of the rotor wheel, and to verify the numerical model.

Keywords: vibrometry, natural frequency, rotor wheel vibration modes, speckle interferometry

REFERENCES

- [1] Ivanov V.P. *Kolebaniya rabochikh koles turbomashin* [Vibrations of turbo-machine rotor wheels]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1983, 224 p.
- [2] Belousov M.G., Manoshin O.F. *Nauchny vestnik MGTU GA — Civil Aviation High Technologies*, 2018, vol. 21, no. 4, pp. 60–72.
- [3] Makaeva R.Kh., Karimov A.Kh., Tsareva A.M. *Diagnostika detaley i uzlov turbomashin po ikh vibratsionnym kharakteristikam s primeneniem golograficheskoy interferometrii* [Diagnostics of turbo-machine assemblies and parts by their vibration characteristics using holographic interferometry]. Kazan, KAI Publ., 2011, 242 p.
- [4] Seleznev V.G., Pavlov Yu.I., Ilinskaya O.I. *Vestnik MGTU im. N.E. Baumana. Series Mashinostroenie — Herald of the Bauman Moscow State Technical University. Series Mechanical Engineering*, 2015, no. 1, pp. 93–100.
- [5] Seleznev V.G., Golovchenko I.Yu. *Dinamika i vibroakustika — Journal of Dynamics and Vibroacoustics*, 2018, vol. 4, no. 3, pp. 26–30.
- [6] Laxalde D.L., Thouverez F., Sinou J.-J., et al. Mistuning Identification and Model Updating of an Industrial Blisk. *International Journal of Rotating Machinery*, vol. 2007, Hindawi Publishing Corp. Article ID 17289, 10 p.
- [7] Inozemtsev A.A., Nikhamkin M.Sh., Voronov L.V., Senkevich A.B., Golovkin A.Yu., Bolotov B.P. *Tyazheloe mashinostroenie (Heavy Engineering)*, 2010, no. 11, pp. 2–6.
- [8] Igolkin A.A., Safin A.I., Makaryants G.M., Kruchkov A.N., Shakhmatov E.A. *Prikladnaya Fizika — Applied Physics*, 2013, no. 4, pp. 49–53.
- [9] Ryzhikov I.N. *Vestnik rkutskogo gosudarstvennogo tehnikeskogo universiteta — Proceedings of Irkutsk State Technical University*, 2014, no. 12 (95), pp. 53–57.

- [10] Jones R., Wykes C. *Holographic and speckle interferometry*. Cambridge, Cambridge University Press, 1989, 368 p. [In Russ.: Jones R., Wykes C. *Golograficheskaya i spekl-interferometriya*. Moscow, Mir Publ., 1986, 328 p.].
- [11] Osipov M.N., Scheglov Yu.D. *Vestnik Nizhegorodskogo universiteta im. N.I. Lobachevskogo — Vestnik of Lobachevsky University of Nizhni Novgorod*, 2011, no. 4, pp. 1672–1675.
- [12] Tkach M.R., Zolotoy Yu.G., Dovgan D.V. *Aviatsionno-kosmicheskaya tekhnika i tekhnologiya (Aerospace engineering and technology)*, 2013, no. 9 (95), pp. 203–207.
- [13] Komarov S.Yu. *Pomekhoustoychivy tsifrovoy spekl-interferometr dlya vibrometrii obektov na osnove metoda usredneniya vo vremeni. Diss. kand. tekh. nauk* [Interference immune speckle interferometer for vibrometry of objects based upon time average method. Cand. eng. sc. diss.]. Samara, 2004, 234 p.
- [14] Zhuzhukin A.I. *Trudy MAI — Proceedings of MAI*, 2011, no. 47. Available at: <https://trudymai.ru/published.php?ID=26555>
- [15] Zhuzhukin A.I. *Vestnik Samarskogo Universiteta. Estestvenno-Nauchnaya Seria (Vestnik of Samara State University. Natural Sciences Series)*, 2013, no. 9/2 (110), pp. 80–86.
- [16] Zhuzhukin A.I. *Vestnik MGTU im. N.E. Baumana. Series Mashinostroenie — Herald of the Bauman Moscow State Technical University. Series Mechanical Engineering*, 2017, no. 3, pp. 66–74. DOI: 10.18698/0236-3941-2017-3-66-74
- [17] Sheglov Yu.D. *Vestnik Samarskogo gosudarstvennogo aerokosmicheskogo universiteta im. S.P. Koroleva (Bulletin of Samara University)*, 2012, no. 3 (34), pp. 125–132.
- [18] Zhuzhukin A.I., Solyannikov V.A. *Izvestiya Samarskogo nauchnogo centra Rossiyskoy akademii — Izvestia of Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences*, 2013, vol. 15, no. 4, pp. 192–195.

Zhuzhukin A.I., Cand. Sc. (Eng.), Design Engineer, JSC Kuznetsov.

Nepein K.G., Head of Research and Development Division, JSC Kuznetsov.
e-mail: kg.nepein@uec-kuznetsov.ru