

**ИССЛЕДОВАНИЕ ФОРМ И ЧАСТОТ КОЛЕБАНИЙ
БАНДАЖИРОВАННОГО КОЛЕСА ВЕНТИЛЯТОРА
НА ГОЛОГРАФИЧЕСКОЙ УСТАНОВКЕ
И В СОСТАВЕ ДВИГАТЕЛЯ НА ИСПЫТАТЕЛЬНОМ СТЕНДЕ**

© 2014 А. О. Коскин, В. Г. Селезнёв

Центральный институт авиационного моторостроения имени П.И. Баранова,
г. Москва

В статье сообщается о результатах применения метода голографической интерферометрии для анализа форм колебаний вращающегося колеса вентилятора. До настоящего времени практически не имеется экспериментальных работ, объясняющих поведение рабочих колёс турбомашин в составе двигателя, исходя из знаний форм и частот колебаний исследуемого колеса при отсутствии вращения. Имея изначально амплитудно-частотные характеристики рабочего колеса в виде картин форм колебаний с соответствующими частотами, а затем и данные тензометрирования этого колеса в составе двигателя, можно провести анализ форм колебаний вращающегося колеса. Формы колебаний, полученные на голографической установке, отождествляются с формами колебаний вращающегося колеса по совпадению их частот. Приводятся частоты и формы колебаний колеса первой ступени вентилятора, полученные методом голографической интерферометрии, и частоты, полученные методом спектрального анализа при тензометрировании этого колеса. Близкие значения частот позволили осуществить «привязку» форм колебаний к частотам вращающегося колеса. Важность знания форм колебаний колёс турбомашин поясняется примером исследования колеса ротора турбины. Было обнаружено наличие «горизонтальной» связи для некоторых форм колебаний, когда почти одной и той же частоте соответствуют две формы колебаний. На основании проведённых исследований можно сделать вывод, что перед установкой рабочего колеса в двигатель необходимо определить собственные частоты и формы колебаний этого колеса с использованием современных оптических методов, в частности голографической интерферометрии, что позволит более надёжно прогнозировать возникновение разного рода колебаний при его работе в составе двигателя.

Формы колебаний, ротор, вентилятор, резонансные колебания, голографическая интерферометрия.

Данная работа лежит в русле выдвинутой В. П. Ивановым концепции общего подхода к теоретическому и экспериментальному исследованию колебаний рабочих колёс (РК) турбомашин как единых упругих систем [1]. Она, в некоторой степени, дополняет экспериментальные знания в этой области, поскольку такое подробное исследование рабочего колеса как единой упругой системы до сих пор не проводилось.

До настоящего времени практически не имеется экспериментальных работ, объясняющих поведение рабочих колёс (РК) турбомашин в составе двигателя, исходя из знаний форм и частот колебаний исследуемого колеса при отсутствии вращения. Кроме того, при объяснении процессов, происходящих в

лопатках, как правило, игнорируется принадлежность лопаток к колесу, т. е. к системе «диск–лопатки–бандаж». При этом лопатки рассматриваются изолированно от диска.

При проведении экспериментальных исследований РК либо в системе двигателя, либо при снятии амплитудно-частотных характеристик на голографической установке при отсутствии вращения, вопрос о связанности колебаний лопаток и диска не возникает, т. к. имеется единая механически связанная система диск–лопатки. Этот вопрос возникает при трактовке полученных экспериментальных результатов, и качество её зависит от имеющейся математической модели. К настоящему времени уже очевидно, что модель с жёстким диском не является

адекватной, поскольку, в лучшем случае, может только качественно, а не количественно объяснить такие явления, как локализация мод и картины расстройки лопаток по колесу. В конечном итоге, такая модель не позволяет определить, по какой форме колебаний системы «диск–лопатки–бандаж» реализуются максимальные напряжения в лопатках колеса.

Следует отметить, что знание сдвигов фаз колебаний между лопатками РК хотя и даёт частичное представление о числе волн деформаций в окружном направлении, тем не менее, не всегда позволяет идентифицировать колебания в системе. Отсюда представляется целесообразным использовать оптические методы, в том числе и голографическую интерферометрию, которые дают полное представление о формах колебаний системы «диск–лопатки–бандаж» для более полного понимания процессов, происходящих во вращающихся колёсах.

Известно, что нагрузка, а следовательно и прочность элементов рабочего колеса при его вращении зависит от аэродинамических и центробежных сил. Реакция колеса в виде форм и частот колебаний, которые могут или не могут возбуждаться под действием этих сил, обуславливается его конструкцией.

Информация о формах и частотах колебаний, полученная по интерферограммам, не может быть избыточной и является необходимой при анализе данных, полученных при исследовании этого колеса на стенде в составе двигателя. Поэтому в дальнейшем для более ясного понимания процесса, происходящего в РК, требуется, в первую очередь, экспериментально исследовать его амплитудно-частотные характеристики на голографической установке или на сканирующем лазерном виброметре.

Имея изначально амплитудно-частотные характеристики РК в виде картин форм колебаний с соответствующими частотами, а затем и данные тензометрирования этого колеса в составе двигателя, можно провести анализ форм колебаний вращающегося колеса.

Важность использования оптических методов при исследовании колебаний РК можно пояснить на следующем примере. На голографической установке были исследованы формы колебаний колеса ротора турбины [2]. По данным исследований был построен график зависимости частоты колебаний колеса f от числа узловых диаметров n для трёх семейств (рис. 1).

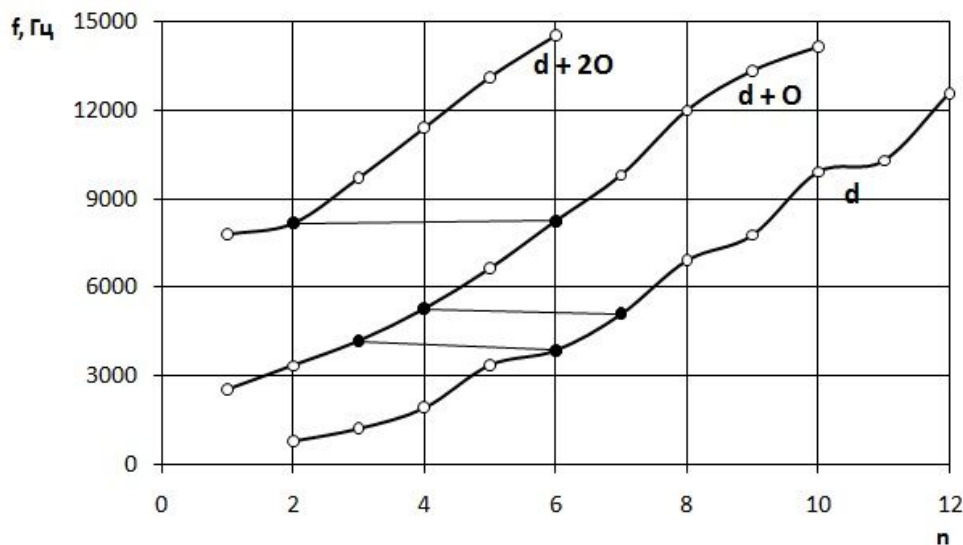


Рис. 1. График зависимости частоты колебаний колеса от числа узловых диаметров

Последующий анализ интерферограмм необычных форм колебаний позволил обратить внимание на

следующий факт. Из интерферограммы, приведённой на рис. 2, а, видно, что форма колебаний, возбуждаемая на

частоте 4039 Гц, несёт в себе признаки одновременно двух семейств: три диаметра с окружностью по диску (4172 Гц) и шесть диаметров по лопаточному венцу (3870 Гц). Аналогичную ситуацию можно наблюдать на частоте 5170 Гц для формы

четыре диаметра по диску и семь диаметров по лопаточному венцу (рис. 2, б). Ближайшей ей частоте 5268 Гц соответствует форма четыре диаметра плюс окружность, а частоте 5100 Гц – форма с семью диаметрами.

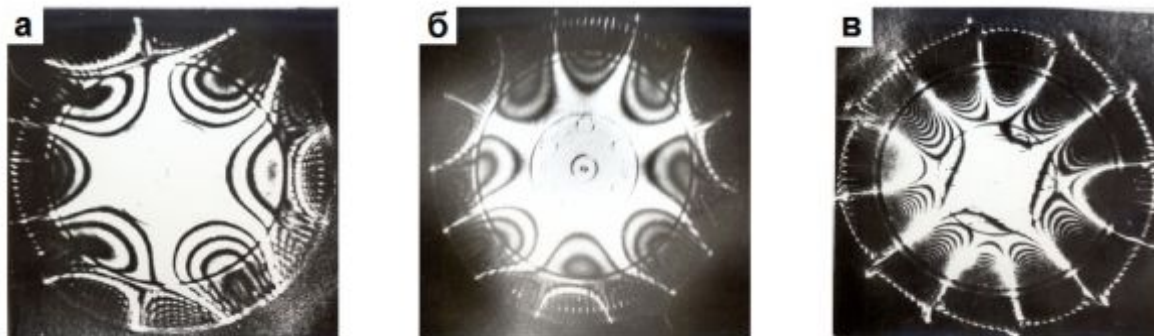


Рис. 2. Интерферограммы форм колебаний, записанные на частотах:
а – 4039 Гц, б – 5170 Гц, в – 8232 Гц

Из приведённых для исследованного колеса примеров можно предположить наличие «горизонтальной» связи для некоторых форм колебаний (рис. 1), когда почти одной и той же частоте соответствуют две формы колебаний.

Ещё одна наглядная иллюстрация приведена на рис. 2, в, когда в результате «взаимодействия» формы с двумя диаметрами и двумя окружностями (8170 Гц) и близкой по частоте формы с шестью диаметрами и окружностью (8250 Гц) наблюдается интерферограмма, записанная на частоте 8232 Гц и показывающая, что середина колеса колеблется по форме с двумя диаметрами, а остальная его часть – по форме шесть диаметров плюс окружность.

Обнаруженное явление может оказаться полезным и дополнить ограниченную информацию о колебаниях рабочих колёс, полученную при тензометрировании колеса на двигателе.

Такое повторение одной и той же идеи о предварительном определении форм колебаний РК перед их испытаниями в составе компрессора или

турбины в двигателе объясняется тем, что, насколько известно авторам, подобные исследования никогда не проводились, в результате чего, по нашему мнению, было потеряно много полезной информации. Поэтому ограниченную информацию, полученную в результате тензометрирования лопаток РК, нужно обязательно дополнять формами колебаний рабочих колёс.

На практике большой интерес представляют колебания первых ступеней вентиляторов. Подробный набор голографических интерферограмм форм колебаний рабочего колеса первой ступени вентилятора (рис. 3) был получен при демонстрации возможностей импульсного лазера для исследования форм и частот колебаний крупногабаритных деталей ГТД [3].

При анализе результатов тензометрирования в спектре, приведённом на рис. 4, были обнаружены составляющие, частоты которых практически совпадают с частотами, полученными на голографической установке.

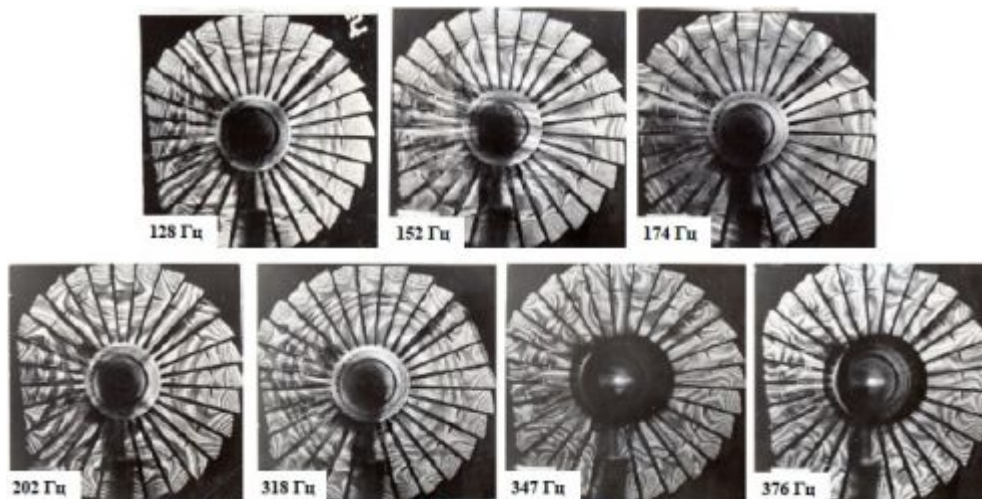


Рис. 3. Формы колебаний бандажированного колеса вентилятора на различных частотах



Рис. 4. Спектр колебаний 1-ой ступени вентилятора при тензометрировании

В табл. 1 приведены частоты и установка, а также частоты спектрального формы колебаний колеса вентилятора, анализа результатов тензометрирования, полученные на голографической

Таблица 1 - Частоты, полученные при тензометрировании и методом голографической интерферометрии для разных форм колебаний

Голографическая интерферометрия		Тензометрирование
f, Гц	Форма	f, Гц
128	2d	—
152	1d+O	—
174	4d	174
202	2d+O	203
318	1d+O	316
347	3d+O	349
376	4d+O	375

По результатам тензометрирования голографической установке была колеса вентилятора и определения его построена резонансная диаграмма форм и частот колебаний на (рис. 5).

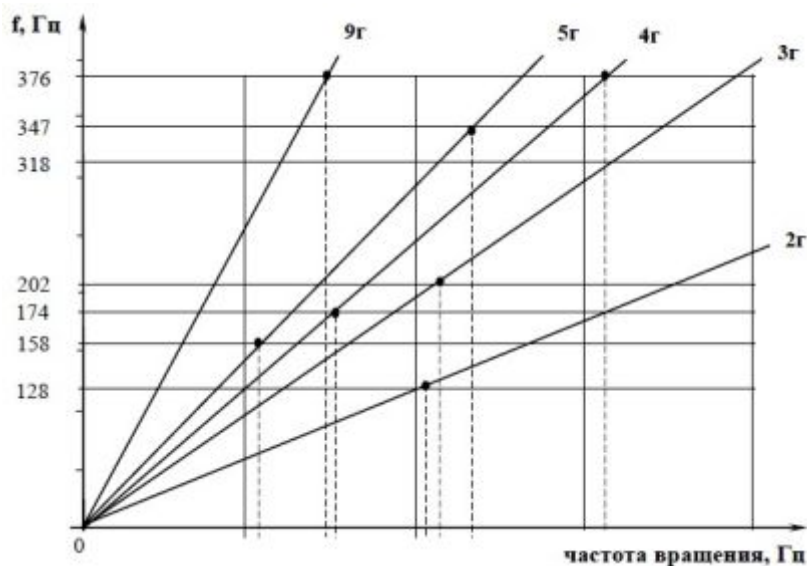


Рис. 5. Резонансная диаграмма бандажированного колеса вентилятора

На основании проведённых исследований можно сделать вывод, что перед установкой рабочего колеса в двигатель необходимо определить собственные частоты и формы колебаний этого колеса с использованием современных оптиче-

ских методов, в частности голографической интерферометрии, что позволит более надёжно прогнозировать возникновение разного рода колебаний при его работе в составе двигателя.

Библиографический список

1. Иванов В.П. Колебания рабочих колёс турбомашин. М.: Машиностроение, 1983. 224 с.
2. Селезнёв В.Г. Голографическая интерферометрия в задачах оценки прочности авиационной техники // Конверсия в машиностроении. 1995. № 1. С. 25-29.

3. Комар В.Г. и др. О системе голографического кинематографа, предназначенного для исследования и контроля интерференционным методом деформаций и напряжений вибрирующих и вращающихся изделий // Труды Всесоюзного науч.-исслед. кинофотоинститута НИКФИ. Вып. 110. М.: НИКФИ, 1982. С. 5-13.

Информация об авторах

Коскин Александр Олегович, заместитель начальника отдела динамических измерений, Центральный институт авиационного моторостроения имени П.И. Баранова. E-mail: koskin@bk.ru. Область научных интересов: динамика деталей и узлов транспортных машин.

Селезнёв Валерий Григорьевич, старший научный сотрудник, Центральный институт авиационного моторостроения имени П.И. Баранова. E-mail: dep007@rtc.ciam.ru. Область научных интересов: динамика деталей и узлов транспортных машин.

THE STUDY OF SHROUDED FAN VIBRATION MODES AND FREQUENCIES ON HOLOGRAPH AND AS A PART OF THE ENGINE ON THE TEST RIG

© 2014 A. O. Koskin, V. G. Seleznev

Central Institute of Aviation Motors, Moscow, Russian Federation

The article reports about application results of holographic interferometry method for the analysis of rotating fan vibration modes. So far there are no practically the experimental works explaining behavior of turbomachinery bladed discs as a part of the engine, on the basis of knowledge about modes and frequencies of observable disc in the absence of rotation. Having initially bladed disc amplitude-frequency characteristics in the form of vibration modes pictures with the corresponding frequencies, and then strain-gauging data for this disk being a part of the engine, makes it possible to carry out the vibration modes analysis of rotating disk. Vibration modes, received on holographic installation, are identified with vibration modes of a rotating disc on coincidence of their frequencies. Vibration frequencies and modes of a fan first stage, received on holograph, and the frequencies, received using spectral analysis method for strain-gauging data, are given in the article. Close values of these frequencies allowed to connect vibration modes with rotating disc frequencies. Moreover, there is the example of turbine rotor disc research, illustrated the importance of knowledge of turbomachinery discs vibration modes, in the article. The study revealed the existence of "horizontal" connection for some vibration modes, when two different vibration modes accord with almost the same frequency. On the basis of the carried-out study it is possible to draw a conclusion that before installation of the bladed disc in the engine it is necessary to define natural frequencies and vibration modes of this disc using modern optical methods, in particular a holographic interferometry; that will allow to predict more reliably any occurrence of disc vibrations during its working as a part of the engine.

Vibration modes, rotor, fan, resonance vibration, holographic interferometry.

References

1. Ivanov V.P. *Kolebaniia rabochikh koles turbomashin* [Vibration of blade wheels]. Moscow: Mashinostroenie Publ., 1983. 224 p.
2. Seleznev V.G. Application of holographic interferometry to solve strength problems of aircraft structures // *Konversiya v mashinostroenii*. 1995. No. 1. P. 25-29. (In Russ.)
3. Komar V.G., Serov O.B., Skibin V.A., Seleznev V.G., Elenevskii D.S., Sipukhin I.G., Shaposhnikov Iu.N., Mashkovtsev A.N. About the holographic cinematograph system intended for researching and controlling strain and stress of the vibrating and rotating items by an interference method // *Trudy Vsesoyuznogo nauch.-issled. kinofotoinstituta NIKFI*. V. 110. Moscow: NIKFI Publ., 1982. P. 5-13. (In Russ.)

About the authors

Koskin Aleksandr Olegovich, deputy chief of department of dynamic measurements, Central Institute of Aviation Motors, Moscow, Russian Federation. E-mail: koskin@bk.ru. Area of Research: dynamics of transport machinery parts and units.

Seleznev Valerii Grigor'evich, senior staff scientist, Central Institute of Aviation Motors, Moscow, Russian Federation. E-mail: dep007@rtc.ciam.ru. Area of Research: dynamics of transport machinery parts and units.