

УДК 620.178.53:621.438

И. В. Дрокин

ОАО «Мотор Сич», г. Запорожье

О ВОЗМОЖНОСТИ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ СРЫВНЫХ КОЛЕБАНИЙ РАБОЧИХ ЛОПАТОК КОМПРЕССОРА ГТД С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МЕТОДОВ ЦИФРОВОЙ ОБРАБОТКИ ДАННЫХ ВИБРОИСПЫТАНИЙ

Рассмотрена возможность использования метода вибрационной диагностики на основе применения системы цифровой обработки данных датчика вибраций для анализа срывных колебаний рабочих лопаток компрессора ГТД.

Компрессор, срывные колебания, рабочие лопатки, виброиспытания, прогнозирование

Введение и постановка задачи

Эксплуатация современных газотурбинных двигателей (ГТД) сопровождается, как правило, действием динамических нагрузок, обуславливающих возбуждение колебаний и высокий уровень вибрационной напряженности таких ответственных конструктивных элементов, как рабочие лопатки, что может привести к их разрушению.

Одними из основных источников вынужденных колебаний рабочих лопаток компрессоров ГТД являются, как известно [1], окружная неоднородность набегающего на рабочее колесо потока газа и вращающийся его срыв на отдельных лопатках венца. Вынужденные колебания рабочих лопаток, обуславливаемые вращающимся срывом потока, получили название срывных. Если для вынужденных колебаний лопаток, вызванных окружной неоднородностью потока, характерна линейная зависимость между частотами возбуждения n и вращения ротора Ω

$$v = m_B \Omega / 60, \quad (1)$$

где m_B – номер гармоники возбуждения, представляющий целое число, то при срывных колебаниях она уже является дробным числом.

При некоторых условиях возникает одна или несколько зон срывного обтекания лопаток, которые перемещаются в направлении вращения рабочего колеса с некоторым отставанием. Вращающийся срыв вызывает колебания корпусов ГТД, частота которых при развитом срыве составляет $(0,3...0,7)\Omega$, а число его зон при этом может достигать 7. Кроме того, она не имеет жесткой связи с частотой вращения ротора.

Исследованию вращающегося срыва и колебаний рабочих лопаток компрессоров ГТД с помощью спектрального анализа результатов их тензометрирования посвящено много работ, в частности [2, 3]. Однако процесс тензометрирования является довольно трудоемким и требует

применения таких сложных устройств, как токосъемники. В настоящее время в практике виброиспытаний газотурбинных двигателей получил распространение метод вибрационной диагностики на основе применения системы цифровой обработки данных [4]. Поэтому цель данной работы состоит в определении возможностей этого метода для анализа срывных колебаний рабочих лопаток компрессора ГТД.

Объект и методика исследований

В качестве объектов исследования были выбраны рабочие лопатки, изготовленные из титанового сплава BT8 всех ступеней компрессора современного авиационного ГТД в классе мощности до 2500 л.с., поперечный разрез которого приведен на рис. 1.

Для решения задачи в соответствии с методом вибрационной диагностики на основе применения системы цифровой обработки данных на корпусе исследуемого двигателя в плоскости

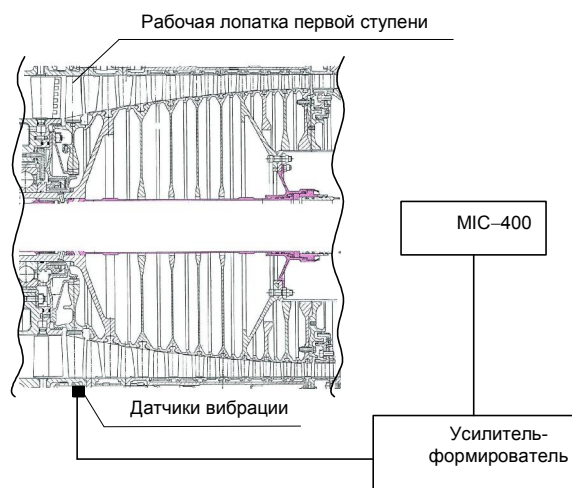


Рис. 1. Поперечный разрез компрессора, схема размещения датчика вибрации и его подключения к системе цифровой обработки данных

расположения рабочих лопаток 1-й ступени был установлен пьезоэлектрический датчик вибраций со встроенной электроникой Endevco (США), как показано на рис. 1, который подключался к усилителю-формирователю и далее, к программно-аппаратному комплексу МІС-400 [5]. Такая схема установки базируется на предположении, что при возникновении в рабочих лопатках значительных динамических напряжений, вызванных их срывными колебаниями, они могут локально, в непосредственной близости к плоскости расположения рабочего колеса исследуемой ступени компрессора, передаваться на корпус двигателя, тем самым, возбуждая его колебания. Поэтому результаты их анализа с помощью программно-обеспечения WinПОС [6] могут использоваться как информационный признак возбуждения срывных колебаний рабочих лопаток.

Поскольку, как отмечалось выше, частота колебаний корпуса не имеет жесткой связи с частотой вращения ротора, с целью проверки, что эти колебания вызываются именно вращающимся срывом, испытания двигателя проводились как со штатным углом установки направляющих лопаток, который составляет (-30°), так и при увеличении его абсолютной величины на 3° , т.е. (-33°).

Одновременно, для подтверждения обоснованности использования выбранного метода вибрационной диагностики для решения поставленной задачи, осуществлялся также анализ колебаний рабочих лопаток компрессора методом тензометрирования.

Результаты испытаний и их анализ

Первоначально, для определения ступени компрессора, подвергающейся действию вращающегося срыва, был проведен анализ данных испытаний двигателя во всем рабочем диапазоне частот вращения ротора, полученных методом тензометрирования рабочих лопаток всех ступеней, которые представлены на рис. 2 в виде частотной зависимости максимальных динамических напряжений.

Было установлено, что колебания лопаток всех ступеней, кроме первой, носят резонансный характер, а их максимальные напряжения не превышают допустимых. Для лопаток первой ступени, разброс собственных частот которых составлял 594...632 Гц, в диапазоне частот вращения ротора $\Omega = 11300...15000$ об/мин или $\nu = 188...250$ Гц, максимальные напряжения, которые проявлялись при запуске двигателя на режиме ниже малого газа, существенно превосходят допустимые. Были зарегистрированы одночастотные колебания лопаток по первой изгибной форме с кратностью $m_B = 3,2...3,6$ (см. рис. 3), что соответствует определению срывных колебаний. Учитывая, что при вращающемся срыве могут возникать несколько зон срывного обтекания лопаток, то из этого следует, что колебания лопаток на собственной частоте вызывают гармоники вращающегося срыва.

Исходя из полученных данных тензометрирования, все дальнейшие исследования прово-

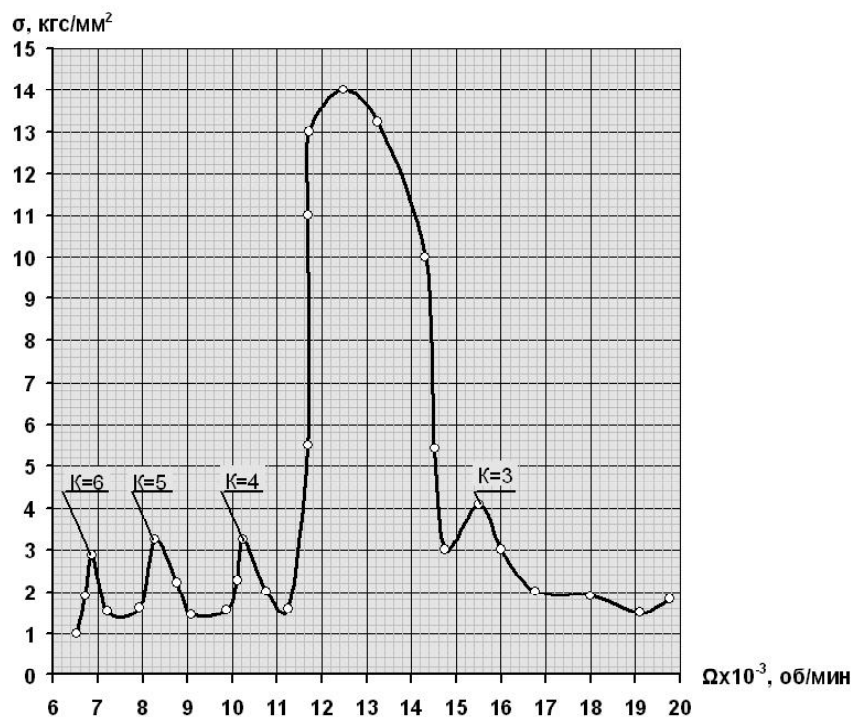


Рис. 2. Частотная зависимость максимальных динамических напряжений рабочих лопаток компрессора

дились по изучению срывных колебаний лопаток 1-й ступени с использованием метода вибрационной диагностики колебаний корпуса ГТД на основе применения системы цифровой обработки данных испытаний.

В соответствии с изложенной выше методикой обработки сигналов датчика вибрации с помощью комплекса МІС-400 были определены их трехмерные спектры, приведенные на рис. 4. Они представляют собой отображение амплитудно-частотных зависимостей сигналов во времени, получаемое путем разложения в ряд Фурье исходного сигнала в соответствии с методикой, изложенной в [4]. Здесь по осям X и Y отложены частота и амплитуда колебаний соответственно, а по оси Z - время. Такое представление данных позволяет проследить, как изменяется та или иная гармоническая составляющая спектра колебаний во времени, например, при переходных режимах: запуск, проход, останов.

Как видно из представленных данных, полученные спектры сигналов датчика содержат нероторные гармоники возбуждения с кратностью к частоте вращения ротора 4,11...4,23 и 4,03...4,3 при штатном (a) и увеличенном угле установки направляющих лопаток соответственно. Такие гармоники возбуждения проявляются только в процессе запуска двигателя, а на стационарных режимах его работы и в процессе останова они отсутствуют.

При этом следует отметить, что амплитуда гармоники возбуждения увеличивается с возрастанием частоты вращения ротора. Когда частота возбуждения достигает примерно 800 Гц, что соответствует частоте вращения ротора ≈ 190 Гц, амплитуда гармоники резко уменьшается до полного исчезновения. Сравнение данных обработки результатов тензометрирования лопаток (см. рис. 2 и 3) и сигналов датчика вибраций (см. рис. 4) показывает, что они хорошо коррелируют по режиму работы двигателя и по частотному диапазону проявления срывных колебаний.

Также результаты анализа влияния угла установки направляющих лопаток показали, что при выбранном его изменении вращающийся срыв сместился по частоте в сторону увеличения. При этом изменилась и кратность гармоники, что, в свою очередь, подтверждает отсутствие жесткой связи частот вращения ротора и срывных колебаний лопаток.

Однако следует отметить, что имеются и некоторые отличия в величинах частоты и номера гармоник возбуждения, определяемых рассматриваемыми методами. Это обусловлено, во-первых, тем, что испытания проводились неодновременно. Во-вторых, при тензометрировании роторных деталей возникающие вперед и назад бегущие волны вносят «поправку» в номер гармоники возбуждения, что отмечалось и ранее при выполнении подобного рода работ [1].

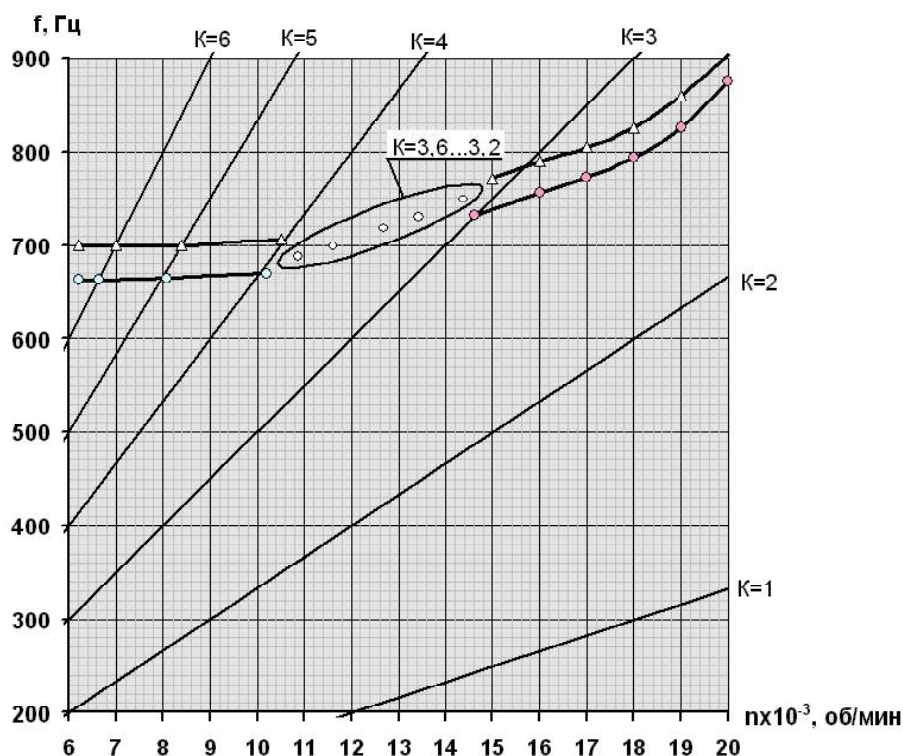
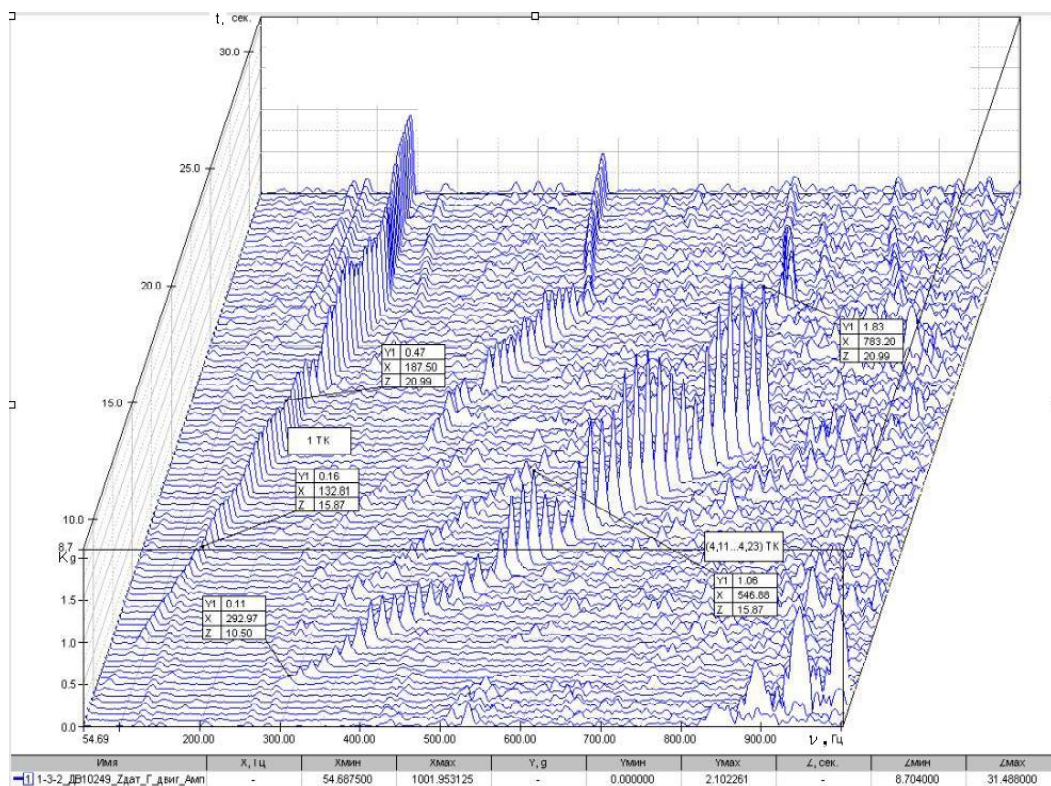
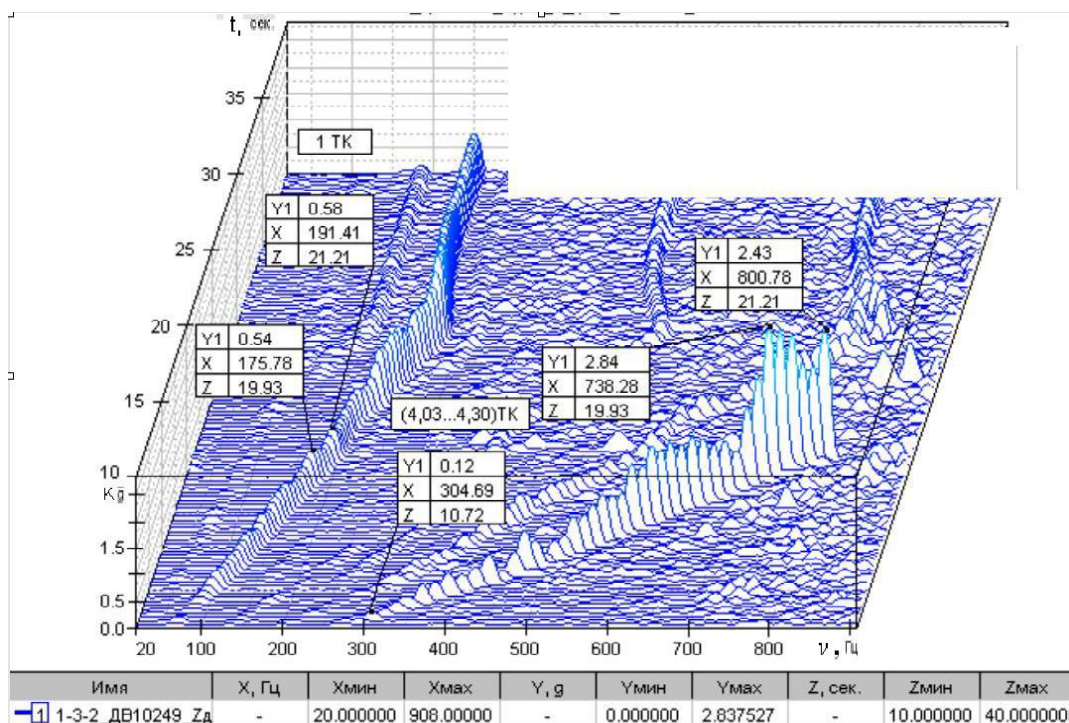


Рис. 3. Частотная диаграмма рабочих лопаток 1-й ступени компрессора



a



b

Рис. 4. Трехмерный спектр сигнала датчика вибрации при работе двигателя в процессе запуска со штатным (а) и увеличенным (б) углом установки направляющих лопаток

Таким образом, на основании представленных выше экспериментальных данных можно сделать однозначный вывод о возможности использования метода вибрационной диагностики на основе применения системы цифровой обработки данных датчика вибраций, установленного на корпусе двигателя в области расположения исследуемой ступени рабочего колеса компрессора, для анализа срывных колебаний рабочих лопаток компрессора ГТД.

Автор выражает искреннюю благодарность д.т.н. проф. А. П. Зиньковскому за оказанную помощь и ценные замечания высказанные при выполнении данной работы.

Перечень ссылок

1. Иванов В. П. Колебания рабочих колес турбомашин / В. П. Иванов. — М. : Машиностроение, 1983. — 224 с.
2. Канунников И. П. Применение метода спектрального анализа при исследованиях вращающегося срыва в компрессорах / И. П. Канунников, М. К. Сидоренко // Аэроупругость турбомашин. — К. : Наук. думка, 1980. — С. 116–124.
3. Кулагина В. А. Исследование вращающегося срыва и колебаний с помощью спектральных методов / В. А. Кулагина, Г. В. Мельникова // Аэроупругость турбомашин. — К. : Наук. думка, 1980. — С. 101–116.
4. Дрокин И. В. Применение системы цифровой обработки данных для виброиспытаний газотурбинных двигателей / И. В. Дрокин // Вибрации в технике и технологиях. — 2001. — № 4 (20). — С. 51–53.
5. Комплексы измерительно-вычислительные МІС. Руководство по эксплуатации. БЛИЖ.401250.001. РЭ — М. : НПП Мера, 2006. — 150 с.
6. WinПОС. Пакет обработки сигналов. Руководство пользователя. — М. : НПП Мера, 2006. — 168 с.
7. Сидоренко М. К. Виброметрия газотурбинных двигателей / М. К. Сидоренко. — М. : Машиностроение, 1973. — 224 с.

Поступила в редакцию 20.07.2009

I. V. Drokin

THE POSSIBILITY OF FORECASTING STALL OSCILLATIONS OF THE ROTOR BLADES OF GTE COMPRESSOR BY MEANS OF DIGITAL PROCESSING OF VIBROTESTING DATA

Розглянуто можливість використання методу вібраційної діагностики на основі застосування системи цифрової обробки даних датчика вібрації для аналізу срывних коливань робочих лопаток компрессора ГТД.

Компрессор, срывні коливання, робочі лопатки, віброиспытання, прогнозування

The possibility of using the method of vibration diagnostics on base of the application of diThere is reviewed possibility of using the method of vibration diagnostics based on application of digital processing of vibration sensor data for the analysis of stall vibrations of the rotor blades of gas turbine engine's compressor.

Compressor, stall vibrations, rotor blades, vibration tests, forecasting