УДК 621. 51.226.2.53

А.А. ХОРИКОВ, А.Г. ШАТОХИН, Т.И. МАЗИКИНА

НИЦ Центрального института авиационного моторостроения, Россия

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МЕТОДИКИ ИССЛЕДОВАНИЯ АЭРОУПРУГИХ ПРОЦЕССОВ В ТУРБОМАШИНАХ НА БАЗЕ ЦИФРОВЫХ РЕГИСТРАТОРОВ-АНАЛИЗАТОРОВ СИГНАЛОВ

Представлена методика экспериментального исследования и диагностики аэроупругих колебаний рабочих лопаток турбомашин, альтернативная тензометрированию. Показано, что эффективность реализации данной методики существенно зависит от качества средств измерений, регистрации и обработки пульсаций статического давления потока в окрестности исследуемого рабочего колеса компрессора или турбины.

турбомашина, рабочая лопатка, аэроупругость, пульсации давления, тензометрия, резонанс, флаттер, вращающийся срыв, диагностика, датчик, усилитель, регистратор, анализатор сигналов.

Экспериментальные исследования аэроупругих колебаний рабочих лопаток прямыми методами измерений – тензометрированием имеют наибольшее распространение в практике доводки турбомашин. Многолетний опыт применения тензометрирования позволил выявить и некоторые негативные стороны данной методики. Работа в условиях высоких давлений, температур, окружных и угловых скоростей обусловливает невысокую надежность тензометров и токосъемных устройств. Ограничение по числу рабочих каналов токосъемных устройств и связанная с этим обстоятельством необходимость перепаек для подключения всех остальных тензометрических измерительных каналов (ИК), предусмотренных программой испытаний, приводит к увеличению сроков и стоимости испытаний. Существуют также проблемы в данной методике, связанные с недостаточной определенностью мест размещения тензометров на лопатках, а также с потребностью организации и проведения повторного тензометрирования в связи с возросшими ресурсами турбомашин.

Для повышения надежности диагностики аэроупругих процессов, как альтернативная тензометрированию, в ЦИАМ была разработана методика, базирующаяся на косвенных методах измерений колебаний рабочих лопаток (РЛ) компрессоров и турбин – измерение параметров высокочастотных пульсаций статического давления потока в окрестности исследуемого рабочего колеса [1]. Указанная методика предъявляет повышенные требования к рабочим параметрам и метрологическим характеристикам ИК. Кратко – это требует использования высокочастотных, нередко высокотемпературных датчиков и кабелей, широкополосных формирователей сигналов с большим динамическим диапазоном и встроенными фильтрами, высокопроизводительных, многофункциональных цифровых регистраторов-анализаторов сигналов, систем отображения и документирования. Отметим, что в качестве датчиков пульсаций давления в данной методике, в частности, успешно применяются датчики типа XTE-190-25G фирмы Kulite, датчики типа 116B02 фирмы PCB, усилители типа 2210 фирмы Vishay Measurement Group, усилители типа 2692-0S4 фирмы B&K. Особо следует подчеркнуть, что эффективная реализация данной методики стала возможной после внедрения в ЦИАМ с 2001г. мобильных цифровых регистраторов-анализаторов динамических процессов MIC-310, а затем и MIC-300M фирмы НПП Мера, г.Королев, Россия [2, 3]. В рассматриваемом вариан-

© А.А. Хориков, А.Г. Шатохин, Т.И. Мазикина

те исполнения прибор обеспечивает синхронную регистрацию динамических процессов по 16 каналам в рабочем диапазоне частот каждого канала 0 … 28,8 кГц и экспресс-анализ данных во временной и частотной областях по каждому каналу. Вместе с этим, в данном приборе установлен программный комплекс цифровой обработки сигналов (ЦОС) – пакет обработки сигналов WinПОС, предназначенный для обработки и полного анализа зарегистрированных динамических процессов.

Практическая реализация предложенной методики диагностики аэроупругих процессов в ходе стендовых испытаний турбомашин осуществляется в соответствии со структурной схемой, представленной на рис. 1. Отсюда следует, что в темпе эксперимента данная методика предоставляет возможность диагностировать фактическое состояние РЛ компрессора или турбины. Варианты диагноза включают в свой состав: нормальное функционирование РЛ, характеризующееся вибрационным шумом, резонанс, вращающийся срыв и флаттер.

Эффективность данной методики была подтверждена в ряде работ по бесконтактной диагностике аэроупругих процессов, в том числе в вентиляторах авиационных газотурбинных двигателей (ГТД).

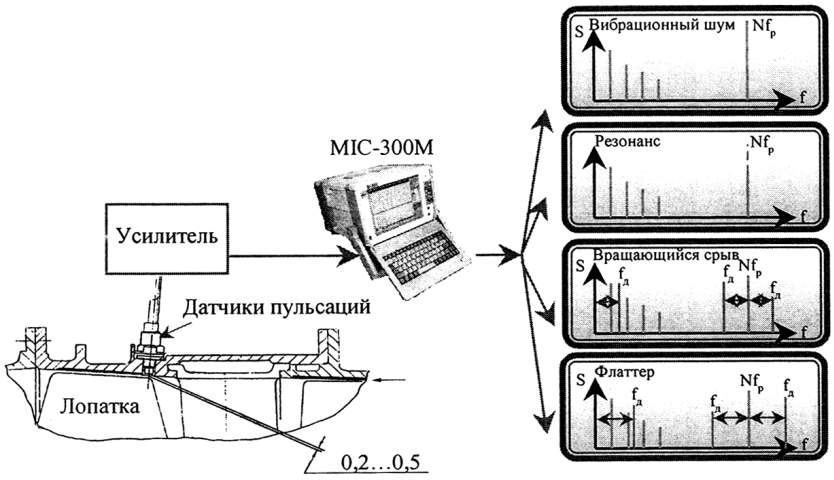

Рис. 1. Схема измерений, регистрации и экспресс-анализа пульсации для диагностики аэроупругих процессов.

В качестве примера на рис. 2 представлены результаты исследования причин усталостных поломок небандажированных РЛ первой ступени двухступенчатого вентилятора, которые не удалось выявить тензометрированием. В процессе наблюдения за пульсациями в темпе эксперимента было обнаружено, что симметрично относительно частоты следования лопаток $f = 18f_p$ ($N = 18$ – число лопаток первой ступени) на расстоянии $\Delta f = 703$ Гц возникают две боковые составляющие $f_1 = 3521$ Гц и $f_2 = 4930$ Гц, причем уровень левой спектральной составляющей всегда был больше, чем правой. При этом на расстоянии $\Delta f = f_3 = 703$ Гц от начала координат также присутствовала спектральная составляющая. В соответствии с рис. 1 такое сочетание спектральных составляющих однозначно указывает на резонанс рабочих лопаток первой ступени от вращающегося срыва. Поскольку величины боковых спектральных составляющих с частотами f_1 и f_2 меньше, чем спектральная составляющая с частотой f_3, то, согласно работе [1], это указывает на существенное превалирование изгибной составляющей над крутильной, что характерно для первой формы колебаний лопаток. Таким способом был определен диапазон оборотов $\bar{n} = 0{,}72 \ldots 0{,}88$, в котором происходил вращающийся срыв, причем максимум пульсаций с частотой $f = 703$ Гц реализовался при $\bar{n} = 0{,}78$.

Последующее более тщательное тензометрирование полностью подтвердило превалирование резонанса лопаток первой ступени от вращающегося срыва с числом $m = 5$ и частотой колебаний лопаток $f = 463$ Гц над резонансом от входной окружной неравномерности потока с $\kappa = 2$.

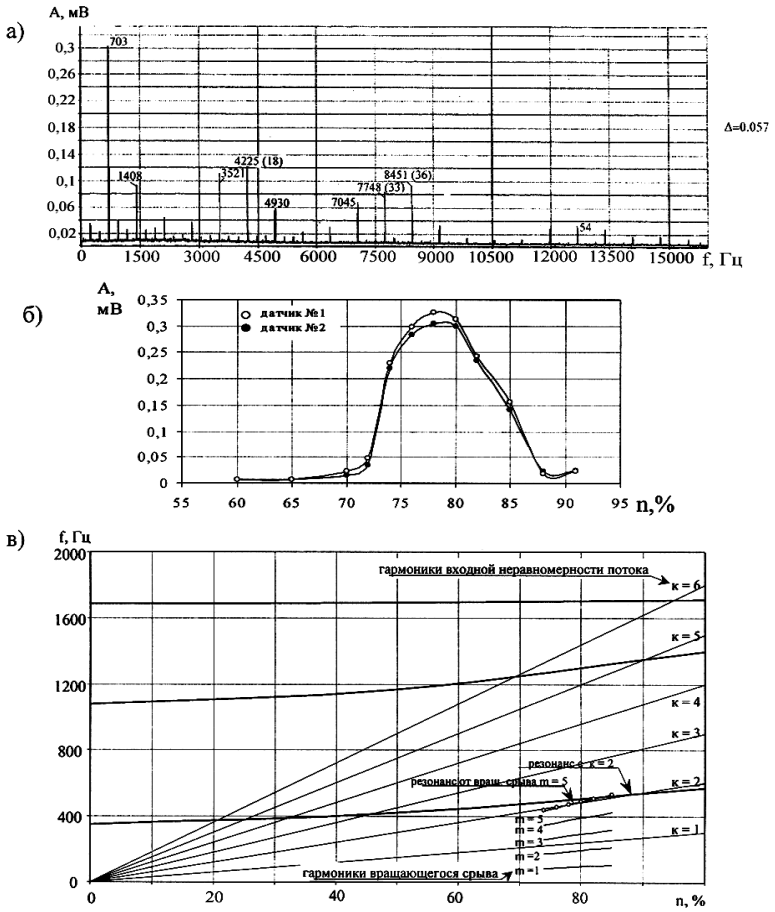

Рис. 2. Диагностика вращающегося срыва: а) текущий спектр пульсаций; б) изменение диагностической спектральной составляющей по оборотам; в) резонансная диаграмма.

В настоящее время цифровые регистраторы-анализаторы MIC-300M, а, следовательно, и предложенная методика непрерывно совершенствуются в процессе решения сложных практических задач. Установленное на прибор соотношение цена/качество позволяет ЦИАМ эффективно внедрять новые технологии диагностики аэроупругих процессов в турбомашинах.

Литература

1. Хориков А.А. Способ диагностики колебаний рабочего колеса осевой турбомашины. Патент №2076307. Б.И. 1997, № 9.

2. Потапов И.А., Каринский В.И., Кузнецов Е.А., Шатохин А.Г. Регистратор динамических параметров авиационных газотурбинных двигателей // Контрольно-измерительные приборы и системы. – № 4. – М.: ЭЛИКС, 2003. – С. 29 – 31.

3. Прибор для измерения, регистрации и анализа параметров вибрационных процессов MIC-300M. Руководство пользователя. – НПП "Мера", 2003.

Поступила в редакцию 25.05.2005

Рецензент: канд. техн. наук С.Б. Петров, ФГУДП НИЦ Центрального института авиационного моторостроения, Россия.