

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 обуславливает 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 коле-

баний 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 ХТЕ-190-25G фирмы Kulite, датчики типа 116B02 фирмы PCB, усилители типа 2210 фирмы Vishay Measurement Group, усилители типа 2692-0S4 фирмы V&K. Особо следует подчеркнуть, что эффективная реализация данной методики стала возможной после внедрения в ЦИАМ с 2001г. мобильных цифровых регистраторов-анализаторов динамических процессов МИС-310, а затем и МИС-300М фирмы НПП Мера, г.Королев, Россия [2, 3]. В рассматриваемом вариан-

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).

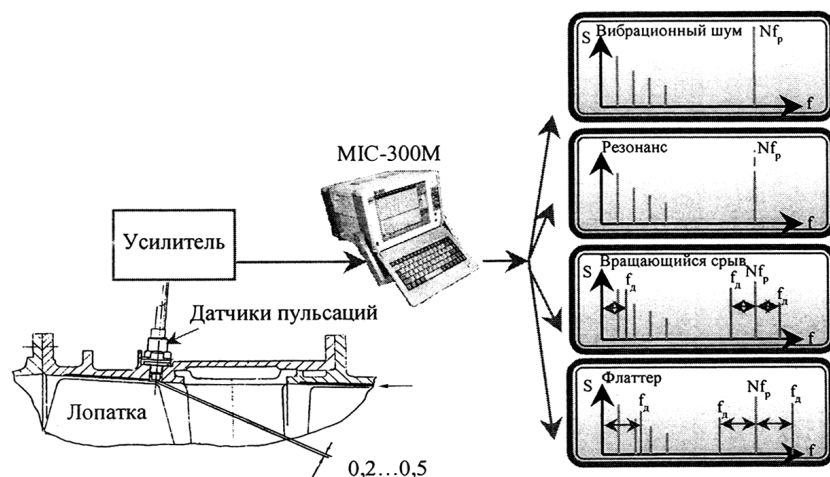


Рис. 1. Схема измерений, регистрации и экспресс-анализа пульсации для диагностики аэроупругих процессов.

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 состав-

ляющая. 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  $\bar{n} = 0,72 \dots 0,88$ , 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  $\kappa = 2$ .

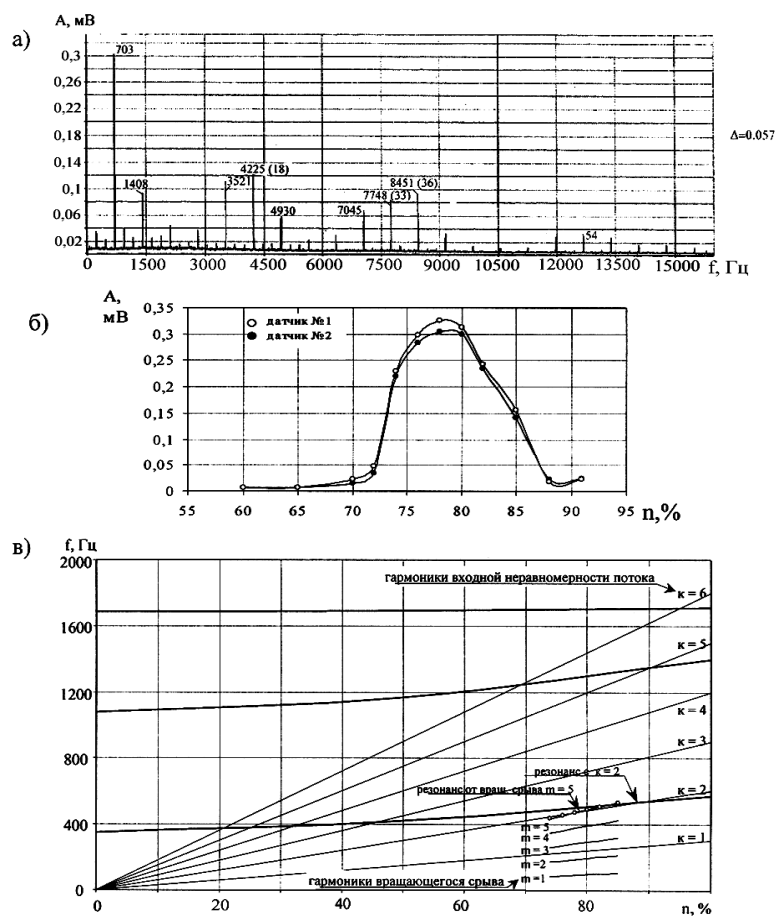


Рис. 2. Диагностика вращающегося срыва: а) текущий спектр пульсаций; б) изменение диагностической спектральной составляющей по оборотам; в) резонансная диаграмма.

В настоящее время цифровые регистраторы-анализаторы МИС-300М, 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.

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 МИС-300М. Руководство пользователя. – НПП "Мера", 2003.

## Литература

Поступила в редакцию 25.05.2005

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

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