

УДК 621.51.226.2.53

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

Центральный институт авиационного моторостроения им. П.И. Баранова, Россия

СИСТЕМА ДИАГНОСТИКИ АЭРОУПРУГИХ КОЛЕБАНИЙ ЛОПАТОК ТУРБОМАШИН НА ОСНОВЕ ВЫСОКОЧАСТОТНЫХ ДАТЧИКОВ ПУЛЬСАЦИЙ И ВЕКТОРНЫХ ВИБРОАКСЕЛЕРОМЕТРОВ

Предложена система бесконтактной диагностики колебаний лопаток турбомашин в стендовых условиях по сигналам с высокочастотных датчиков пульсаций потока и векторных виброакселерометров. Показано, что созданная система не только обладает высокой надежностью диагностики аэроупругих колебаний лопаток, но и позволяет снизить затраты на экспериментальные исследования.

волны деформаций, диагностика, лопатки турбомашин, высокочастотные датчики, векторные преобразователи, измерительные каналы, флаттер, вращающийся срыв

Для бесконтактной диагностики аэроупругих колебаний лопаток турбомашин известен способ, основанный на измерении параметров высокочастотных пульсаций статического давления потока в окрестности исследуемого рабочего колеса [1].

В частности, при возникновении флаттера лопаток в потоке возникают волны деформационных возмущений давления с числом узловых диаметров z , которые имеют вид:

$$P(t) = A \left\{ 1 + \sum_{z=1}^{\infty} \delta_{0z} \cos \omega_z t + \sum_{j=1}^{\infty} \sum_{z=0}^{\infty} I_0(\vartheta_{0z}) P_j \cos \omega_j t + \right. \\ \left. + \sum_{j=1}^{\infty} \sum_{z=0}^{\infty} \sum_{k=1}^{\infty} (-1)^k I_k + \frac{\delta_{0z}}{2} (-1)^{k-1} (I_{k+1} + I_{k-1}) P_j \cos(\omega_j - k\omega_z) t + \right. \\ \left. + \sum_{j=1}^{\infty} \sum_{z=0}^{\infty} \sum_{k=1}^0 I_k + \frac{\delta_{0z}}{2} (I_{k+1} + I_{k-1}) P_j \cos(\omega_j + k\omega_z) t \right\}, \quad (1)$$

где δ_{0z} и ϑ_{0z} – величины, пропорциональные амплитудам изгибной и крутильной составляющим колебаний; $\omega_p = 2\pi f_p$ – частота вращения ротора; $I_k(\vartheta_{0z})$ – функция Бесселя первого рода k – порядка от аргумента ϑ_{0z} ; $\omega_z = \omega_l + z f_p$ – диагностические частоты, обусловленные обобщенным эффектом Доплера; $\omega_l = 2\pi f_l$ – частота колебаний лопатки.

До настоящего времени неизменным условием надежной диагностики являлось близкое расположение датчиков пульсаций к исследуемому объекту. Однако выполнение этого условия часто вызывает большие затруднения из-за необходимости сверления корпуса турбомшины для установки этих датчиков. Предполагалось, что установка этих датчиков

на значительном расстоянии от объекта, очевидно, будет приводить к потере информации об исследуемом вибрационном процессе. Установка однокомпонентных датчиков вибраций обычно не требует сверления корпуса, однако однокомпонентные датчики вибраций измеряют модуль проекции пространственного вектора виброускорения на измерительную ось, положение и ориентация которой никоим образом не связана с вектором деформационной волны при аэроупругих колебаниях лопаток.

В данной работе для повышения информативности диагностики колебаний лопаток предлагается использовать векторные вибропреобразователи фирмы "РЭМ-вибро", созданные на одном пьезок-

ристалле, которые позволяют определять в измерительной точке три ортогональные проекции вектора виброускорения, синфазные с колебательными реакциями этой точки на возмущающие пространственные аэроупругие волны (1).

Созданный на стенде ЦИАМ базовый вариант

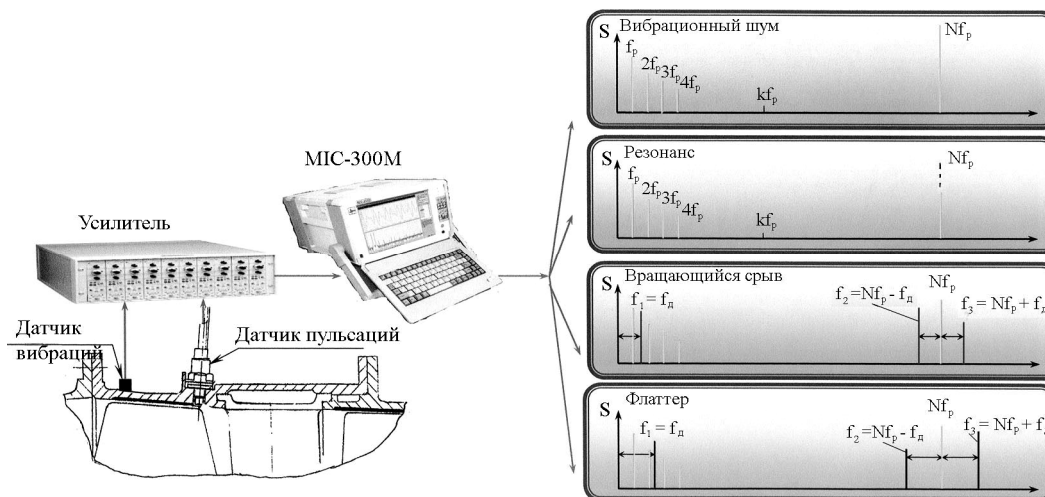


Рис. 1. Система бесконтактной диагностики колебаний лопаток в режиме реального времени на стенде

Принципиальным требованием к реализации ИИС явилось применение современных, надежных СИ серийного исполнения, с гарантийным сроком технического обслуживания не менее 1 года. Аппаратурная реализация системы выполнялась на основе использования отечественных цифровых многоканальных регистраторов-анализаторов фирмы НПП "Мера" MIC-300M. Указанные приборы создавались с учетом технических требований ЦИАМ, разработанных авторами представляемой работы. Совершенствование и адаптирование этих приборов к решению задач динамических процессов и внедрение в отечественное двигателестроение происходило также под их руководством и непосредственном участии. В результате эти приборы были сертифицированы и запущены в серийное производство и по рекомендации ЦИАМ, с учетом приемлемого для нашей промышленности соотношения цена / качество, было начато активное приобретение и использование этих приборов при испытаниях двигателей.

Проведенные исследования показали, что информационно-диагностические возможности и эксплуатационные качества созданной системы пре-

ИИС (рис. 1) включает в себя подсистемы:

- измерения, регистрации и экспресс-анализа высокочастотных пульсаций давления;
- измерения, регистрации и экспресс-анализ высокочастотных вибраций корпусных деталей;
- измерения и регистрации оборотов роторов.

восходят систему тензометрирования при существенно меньших материальных затратах.

В процессе выполнения работы было также установлено, что вибрации, измеренные векторными виброакселерометрами фирмы "РЭМ-вибро", на частотах следования лопаток близки к вибрациям, измеренным по датчикам СА-135 фирмы "Виброметр" по каждой из координатных осей, что позволяет их использовать для определения направления распространения волн деформаций при аэроупругих процессах. Наличие осевой составляющей, обнаруженное с помощью векторных вибродатчиков в спектрах вибраций при флаттере и вращающемся срыве, позволило сделать вывод о том, что диагностические датчики пульсаций можно располагать не непосредственно рядом с исследуемым рабочим колесом, что часто бывает невозможно, а на некотором удалении от него в удобном месте без потери диагностической информации. Следует заметить, что применение векторных вибродатчиков для диагностики аэроупругих процессов имеет следующие преимущества:

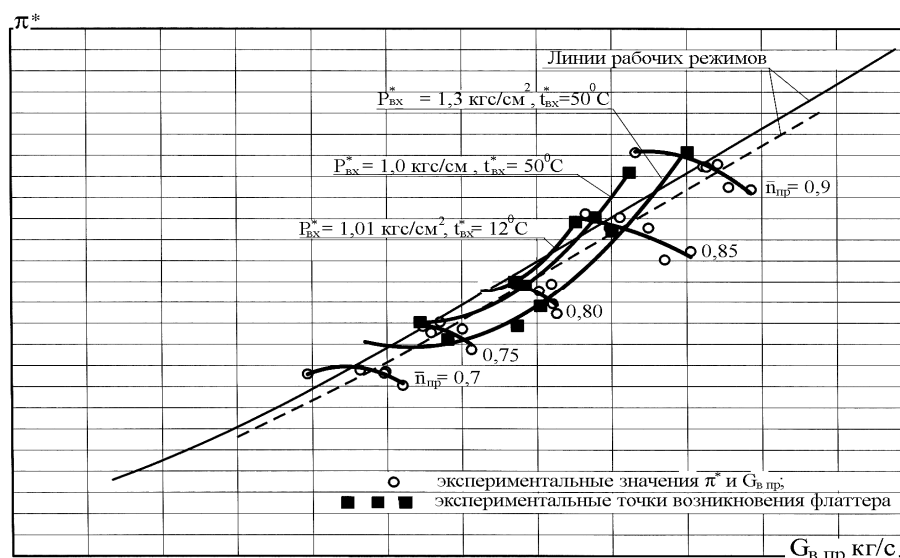


Рис. 2. Границы флаттера лопаток вентилятора на поле напорных характеристик, построенные полиномиальной аппроксимацией экспериментальных данных, полученных ИИС бесконтактной диагностики колебаний лопаток

- не требует конструктивных монтажных доработок исследуемого объекта, необходимых для установки тензодатчиков и датчиков пульсаций;
- предоставляет возможность достоверно регистрировать пространственные динамические характеристики процесса зарождения и развития процесса;
- помимо стендовых испытаний, позволяет проведение оперативной вибродиагностики исследуемых объектов в различных исследовательских и эксплуатационных режимах;
- технологическая проблема размещения диагностических векторных преобразователей существенно упрощена по сравнению с другими измерительными каналами;
- измерительный канал на основе векторных преобразователей существенно дешевле аналогичного комплекта на основе датчика пульсаций и тензометров.

На основе использования созданной ИИС получено наиболее полное подтверждение некоторых ранее выдвинутых теоретических положений и, в частности, были получены новые отличительные признаки срывных колебаний от флаттера лопаток. С использованием созданной ИИС проведены исследования, которые позволили определить место зарождения и интенсивности аэроупругого процесса по тракту турбомашин.

Система была использована при испытаниях вентилятора двигателя малой двухконтурности, когда система тензометрирования лопаток отказала в начале испытаний, и весь намеченный комплекс экспериментальных исследований по исследованию колебаний лопаток был проведен только с использованием этой системы. При этом были не только определены границы вращающегося срыва и флаттера на поле напорных характеристик (рис. 2), но и частоты колебаний лопаток, а также номера диаметральных форм колебаний системы диск-лопатки. Несколько месяцев позднее по требованию Заказчика эти исследования были проведены снова. При этом лопатки были подробно препарированы тензометрами. Результаты, полученные прямым тензометрированием лопаток, полностью подтвердили полученные ранее бесконтактным способом по сигналам с датчиков пульсаций и вибраций.

Литература

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

Поступила в редакцию 29.05.2007

Рецензент: д-р техн. наук, проф. А.В. Фишгойт, Центральный институт авиационного моторостроения им. П.И. Баранова, Москва, Россия.