

УДК 535.3+535.4+681.586.5+621.391

КОМПЛЕКСНЫЙ ПОДХОД К РАЗВИТИЮ АЭРОАКУСТИЧЕСКИХ МЕТОДОВ ДИАГНОСТИРОВАНИЯ ПРОТОЧНОЙ ЧАСТИ ГАЗОТУРБИННЫХ АВИАЦИОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

© 2012 В.Ю. Виноградов, О.Г. Морозов

Казанский национальный исследовательский технический университет
им. А.Н. Туполева – КАИ

Поступила в редакцию 12.03.2012

В статье рассматривается комплексный подход к развитию аэроакустических методов диагностики проточной части авиационных газотурбинных двигателей на основе использования пассивных волоконно-оптических и локационных технологии.

Ключевые слова: *аэроакустические методы, диагностика, волоконно-оптические распределенные датчики, взаимно-спектральная матрица*

Бурное развитие транспорта и в первую очередь авиационного с его высоким уровнем энерговооруженности поставило ряд серьезных проблем. Одна из них – повышение безопасности полетов – является приоритетным направлением развития науки и техники России. Среди основных путей ее решения разработка новых методов диагностирования состояния элементов различных сложных авиационных систем, к которым относится и газотурбинный двигатель (ГТД), как в полете, так и на земле. Развитие новых методов позволит повысить безопасность эксплуатации ГТД, увеличить их срок службы, а также расширить автоматизацию процессов диагностики. Теоретические исследования и опыт эксплуатации ГТД показывают, что в результате применения ряда методов появилась возможность отказаться от регламентированных сроков их ремонта, и получена выгода, равная стоимости 30% парка машин. Одним из таких методов является метод аэроакустической диагностики [1].

Преимущества и недостатки существующих аэроакустических методов. Аэроакустические методы основаны на измерении акустических полей по периферии или площади сопла с помощью узконаправленного сканирующего микрофона при «холодном» режиме работы ГТД. Анализ полученных спектров и сравнение их с эталонными позволяют определять и локализовать дефекты ГТД, в частности его проточной части. Существует ряд дефектов, которые невозможно определить другими, отличными от аэроакустического, методами контроля по причине того, что дефекты неподвижного соплового

аппарата ничтожно мало влияют, например, на вибрационные характеристики ГТД в целом. Как одни из наиболее значимых отметим прогар лопаток соплового аппарата и закоксованность, которые в эксплуатации обнаруживаются лишь при периодических осмотрах эндоскопами.

При проведении экспериментов на моделях в акустическом боксе по изучению акустических характеристик на всех режимах продувки через блок камеры сгорания определено, что до частоты 8 кГц спектры, формируемые за дефектными и эталонной лопатками, изменяются незначительно, в пределах 1%. Начиная с частоты 10 кГц, спектр за дефектными лопатками начинает отличаться от спектра эталона, причем тем интенсивнее, чем выше частота и больше масштаб дефекта. Таким образом, из общего спектра генерируемого аэродинамического шума была выделена составляющая шума дефекта. Наибольший уровень шума генерируется в треть-октавной полосе звукового диапазона со средней частотой 20 кГц на режиме продувки $G=0,5$ кг/с (рис. 1).

Однако аэроакустические методы обладают и недостатками. Так, для их реализации требуется механическое передвижение микрофонов по срезу или площади сопла, что затрудняет процессы сбора и обработки информации, делает диагностическую установку конструктивно-сложной и дорогой. Поэтому становится очевидной необходимость создания нового эффективного аэроакустического метода экспресс-диагностики ГТД, в котором аэроакустическая антенна должна быть выполнена на основе пассивной (неподвижной) системы распределенных волоконно-оптических датчиков (ВОД). Такая антенна могла бы по акустическим, а в случае использования мультиплексированных датчиков и по газодинамическим параметрам выявлять неисправности ГТД на ранней стадии их зарождения.

Виноградов Василий Юрьевич, кандидат технических наук, доцент, научный руководитель группы технической диагностики авиационных двигателей. E-mail: vawin@mail.ru

Морозов Олег Геннадьевич, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой телевидения и мультимедийных систем. E-mail: microoil@mail.ru

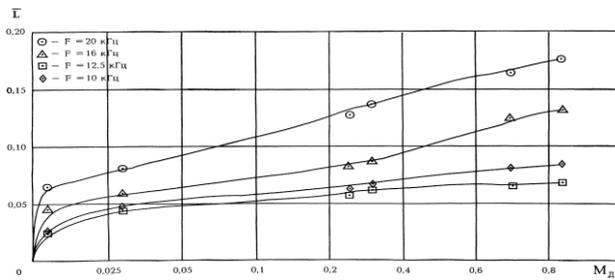


Рис. 1. Распределение относительной разности уровней звукового давления за дефектными и эталонной лопатками по частотам в зависимости от масштаба дефекта M_d для режима $G=0,5$

Единое поле распределенных ВОД как инструмент развития аэроакустических измерений. В рассмотренных условиях необходимо решение задач внедрения комплексированных (распределенных и мультиплексированных) ВОД и создания их единого поля для улучшения качества контроля параметров безопасности двигателей (напряжений, температур, скоростей, прочности и т.д.). Под единым полем комплексированных датчиков для аэроакустических измерений будем понимать множество ВОД, расположенных на некотором расстоянии параллельно плоскости среза сопла, позволяющих получать с одного датчика информацию об одном или нескольких физических процессах и соединенных в общую волоконно-оптическую сеть передачи и обработки информации, управления и синхронизации [2].

С одной стороны, перспективность создания единого поля комплексированных датчиков определяется свойствами созданных одноמודовых ВОД, их универсальной чувствительностью к воздействию различных физических полей: механических, температурных, акустических и др. С другой стороны возможностями многомодовых волокон в связанных системах, их устойчивостью к воздействию внешних помех и стабильностью к изменению условий эксплуатации. И, наконец, особо следует выделить наличие широкого круга волоконно-оптических устройств обработки и преобразования информации, которые позволят объединить отдельные элементы единого поля и их информационные потоки в единую измерительную и управляющую сеть.

Уровни звукового давления замеряются как в отдельных локальных точках, так и по всей площади среза сопла. Для этого используют замкнутую систему из ВОД, которые способны вырабатывать сигналы о динамическом изменении своей конфигурации под действием акустических шумов реактивной струи ГТД. Шаг сетки ВОД увеличивается к кромке сопла двигателя для повышения информативности замеряемых полей параметров. Пространственное динамическое поле (на мониторе) изменяется в местах дефектов (прогара турбинных лопаток или иного дефекта) в сторону, отличную от выхода реактивной струи ГТД, создавая вакуумный эффект.

При этом отсекаются фоновые шумы и более точно определяются неравномерности в шумовой структуре реактивного потока на срезе сопла, чем при использовании микрофонов.

Достаточно очевидно, что для решения задачи восстановления требуется обеспечить определенную плотность укладки измерительных волокон по площади сопла. Можно показать, что плотность укладки, равная $\Omega_C = \sqrt{K/S}$, (1), где K – число измерительных волокон, S – площадь исследуемой области, должна превосходить пространственную частоту исследуемого поля, то есть количество неоднородностей поля на единицу длины [3]. Отметим также, что описываемый подход может исказить исходное распределение поля и давать ложные детали, так называемые артефакты, хотя воздушное сопротивление волоконно-оптической сети несущественно в силу малости площади поперечного сечения волокон. С применением специальной компьютерной обработки эти недостатки удастся преодолеть, при этом картина внешних воздействий может быть полностью восстановлена. Волоконная сеть позволит получить гораздо более детальную информацию о характере исследуемого поля, чем набор микрофонов, или отдельных ВОД.

Принципы пассивной пространственной локации дефектов по единому полю. Для восстановления акустического поля ГТД по данным измерений на выходе ВОД используем принципы пассивной пространственной радиолокации [4]. В предложении идеальной пространственной когерентности сигналы, принимаемые разнесенными K приемниками и соответствующие одному источнику излучения, будут, по всей видимости, полностью коррелированными. На некоторой заданной частоте совокупность этих сигналов можно представить с помощью K -мерного вектора обозначаемого $\alpha \mathbf{u}$, где α – комплексная амплитуда для рассматриваемой решетки, а \mathbf{u} – единичный комплексный вектор, называемый направляющим вектором. При заданной конфигурации приемной решетки направляющий вектор \mathbf{u} является функцией местоположения (т.е. координат) источника дефекта, характеризуемого параметром локации ϕ . Функция $u(\phi)$ определяет, так называемую, модель распространения для данного исследования, представленную следующим образом:

$$u(\phi) = \frac{1}{\sqrt{K}} [e^{jk\phi}]_{k \times 1} \quad k \in [0, K-1], \quad (2)$$

Модель описывает плоскую волну, падающую на линейную решетку эквидистантных приемников (датчиков); здесь ϕ – фазовый сдвиг между соседними приемниками из-за различия длин пути распространения, определяемый выражением

$$\phi = -2\pi \frac{d}{\lambda} \sin \theta, \quad (3)$$

где d – расстояние между приемниками, λ – длина волны, а θ – угол между направлением на источник излучения и нормалью к плоскости решетки, называемый далее углом пеленга. Для некоторой совокупности из N -источников сигналы, наблюдаемые на выходах K -элементной приемной решетки, на заданной частоте определяются K -мерным вектором:

$$x = \sum_{p=1}^N \alpha_p u_p + n, \quad (4)$$

где n – вектор шума, такой, что

$$E\{n\} = 0, \quad E\{nn^+\} = \Gamma_n, \quad (5)$$

где n^+ – транспонированный вектор, сопряженный с вектором n , а Γ_n – ковариационная матрица шума.

Из-за случайных изменений сигналов, обусловленных перемещениями источников (вращением) и флуктуациями характеристик среды распространения (в меньшей степени), комплексные скалярные величины α_p обычно рассматриваются как случайные переменные. В монохроматическом случае эти переменные имеют нулевое среднее значение; их дисперсии характеризуют интенсивности излучения источников. Уравнение (4) можно переписать в матричной форме:

$$x = U\alpha + n. \quad (6)$$

Свойства второго порядка сигналов источников описываются ковариационной матрицей $S = E\{\alpha\alpha^+\}$ (7), которая является взаимно-спектральной матрицей сигналов источников, рассматриваемой на рабочей частоте. Отсюда

следует, что ковариационная матрица принимаемых сигналов тоже является взаимно-спектральной.

Таким образом, мы показали, что для восстановления информации могут быть использованы принципы пассивной радиолокации, основанные на методах спектрального анализа [4]. Общей особенностью таких методов является использование в них взаимно-спектральной матрицы сигнала (дефект), оцениваемой на некоторой заданной частоте (акустической) или в некоторой узкой полосе частот выходного сигнала приемников (датчиков) для граничных условий и условий реализации, определяемых природой аэроакустических методов диагностики.

Выводы: развитие методов и средств аэроакустической диагностики на основе применения единого поля комплексированных ВОД и принципов пространственной пассивной локализации, которые включают в себя широкий круг вопросов от конфигурации поля и методов съема информации до оптимальных алгоритмов ее обмена и принятия решений, позволит сделать новый шаг к решению проблемы безопасности авиационного транспорта.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. *Виноградов, В.Ю.* Диагностирование технического состояния авиационных ГТД по акустическим и газодинамическим параметрам – Казань: Изд. Казан. гос. техн. ун-та, 2004. 176 с.
2. *Морозов, О.Г.* Единое поле комплексированных ВОД в системах контроля параметров безопасности скоростных транспортных средств / *О.Г. Морозов, Ю.Е. Польский* // Вестник КГТУ. 1997. №4. С. 27-31.
3. *Витрик, О.Б.* Проблема «чувствительной кожи» и волоконно-оптические измерительные системы // Соросовский образовательный журнал. 2001. Т. 7, № 1. С. 108-115.
4. *Мюнье, Ж.* Пространственный анализ в пассивных локационных системах с помощью адаптивных методов / *Ж. Мюнье, Ж.Ю. Делль* // ТИИЭР. 1987. Т. 75, № 11. С. 21-38.

COMPLEX APPROACH TO DEVELOPMENT THE AEROACOUSTIC METHODS IN DIAGNOSTICS OF THE FLOW-THROUGH PART OF GAS TURBINE AVIATION ENGINES

© 2012 V. Yu. Vinogradov, O.G. Morozov
Kazan National Research Technical University named after A.N. Tupolev - KAI

In article the complex approach to development the aeroacoustic methods of diagnostics of flow-through part in aviation gas turbine engines on the basis of using the passive fiber-optical and location technologies is considered.

Key words: *aeroacoustic methods, diagnostics, fiber-optical distributed sensors, mutual-spectral matrix*

Vasiliy Vinogradov, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Scientific Supervisor at Technical Diagnostics of Aviation Engines Group. E-mail: vawin@mail.ru

Oleg Morozov, Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Television and multimedia Systems Department. E-mail: microoil@mail.ru