АКУСТИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ, 1996, том 42, № 1, с. 21 - 24

УДК 534.61:534.141.2

ДИАГНОСТИКА ГАЗОТУРБИННОГО ДВИГАТЕЛЯ МЕТОДОМ АКУСТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ЕГО ЭЛЕМЕНТОВ

© 1996 г. Е. В. Белов, Ю. В. Ваньков, И. В. Ившин, А. В. Кочергин, Д. Н. Первухин, А. П. Тунаков

Отделение математики, механики и машиноведения Академии наук Республики Татарстан
420020 Казань, ул. Баумана, 20

Поступила в редакцию 16.11.94 г.

В работе представлены результаты практических исследований применения метода акустических характеристик для определения технического состояния элементов газотурбинного двигателя. Приведено сравнение данного метода с другими методами неразрушающего контроля, применяемыми в авиастроении. Описывается математический аппарат, материальное и программное обеспечение для проведения диагностики.

К наиболее ответственным деталям газотурбинного двигателя (ГТД) относятся лопатки турбины, компрессора и камера сгорания, которые работают в жестких условиях высоких температур, агрессивных сред и больших нагрузок [1 - 2]. Своевременное и надежное определение технического состояния этих элементов двигателя на всех стадиях производства и эксплуатации является основным мероприятием, направленным на обеспечение безопасности полетов. Применяемые в настоящее время на производстве и в эксплуатации методы неразрушающего контроля – оптико-визуальный, капиллярный, вихретоковый, радиографический, ультразвуковой – имеют ряд недостатков, таких как низкая чувствительность, субъективность в принятии решения, большая трудоемкость, а некоторые из них являются вредными для обслуживающего персонала [3].

Предлагается использовать известный метод свободных колебаний (акустических характеристик) [4 - 5] для контроля технического состояния элементов двигателя на всех стадиях его жизненного цикла. В качестве диагностического признака выбран амплитудный спектр собственных колебаний изделий. Сущность метода заключается в возбуждении ударом свободных колебаний в детали двигателя, регистрации этих колебаний микрофоном, формировании амплитудного спектра с использованием быстрого преобразования Фурье (БПФ) при помощи ПЭВМ, сравнении полученного спектра колебаний со спектром исправной детали с привлечением целевых функций и на основе результатов сравнительного анализа формировании заключения о наличии или отсутствии дефекта.

Для проведения экспериментальных исследований акустических характеристик лопаток компрессора и турбины созданы экспериментальная установка и измерительно-диагностический комплекс, разработано необходимое математическое и программное обеспечение.

Общий вид экспериментальной установки представлен на рисунке. Она состоит из стойки *1*, на которой устанавливается конденсаторный микрофон *3*, спецкронштейна *2*, на котором с помощью специального приспособления *4* крепится исследуемое изделие *5*, трехмерного координатника *7* с электроударником *6*.

Экспериментальная установка позволяет однообразно закреплять лопатки при помощи специального приспособления и возбуждать в них ударом колебания, причем удар наносится электроударником в одну и ту же точку поверхности лопатки и с одинаковым усилием.

Измерительно-диагностический комплекс, состоящий из последовательно соединенных конденсаторного микрофона, усилителя, аналого-цифрового преобразователя и ПЭВМ, позволяет принимать колебания от исследуемого изделия, преобразовывать полученный сигнал в цифровой код, формировать амплитудный спектр с использованием БПФ, формировать обобщенный спектр изделия по нескольким идентичным испытаниям с использованием метода помехоустойчивой робастной оценки для исключения случайных факторов при проведении эксперимента, сравнивать спектры текущего сигнала со спектром бездефектной лопатки с использованием целевых функций.

Проведено исследование возможности использования для сравнения спектров и выявления различий, связанных с дефектами, восьми следующих целевых функций, обычно применяемых в теории вероятностей: площадь спектра, корреляция между спектрами, девиация частот основных мод колебаний лопаток, статистика амплитуд, коэффициент затухания колебаний, статистика

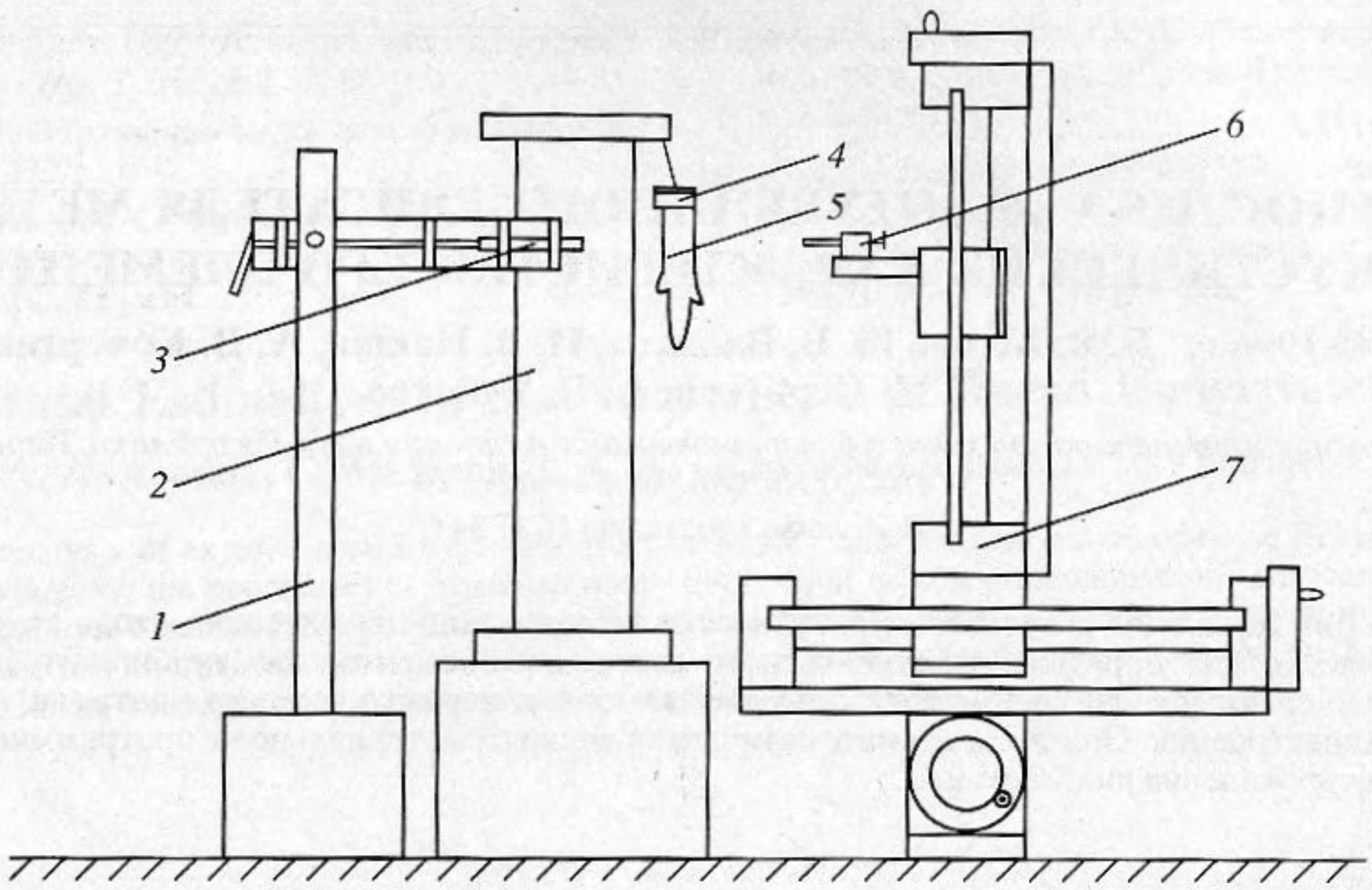

Схема экспериментальной установки. *1* – стойка; *2* – спецкронштейн; *3* – конденсаторный микрофон; *4* – специальное приспособление; *5* – исследуемое изделие; *6* – электроударник; *7* – трехмерный координатник.

ранговой суммы Уилкоксона–Имана, статистика знаков (Фишера), статистика знаковых рангов Уилкоксона–Имана. Для исследования была отобрана группа лопаток исправных и с заранее известными дефектами, среди которых были и только зарождающиеся, т.е. трудно выявляемые. Все отобранные лопатки были испытаны в одинаковых условиях. При обработке результатов испытаний были рассчитаны все восемь упомянутых выше целевых функции, по значениям каждой из которых делалось заключение о наличии или отсутствии дефекта. В лопатках с хорошо заметными дефектами почти все заключения оказались верными, но при анализе всех отобранных лопаток лучшие результаты показал критерий ранговой суммы Уилкоксона–Имана. Близкие к нему результаты показали площадь спектра и статистика амплитуд.

Обработка полученных при исследованиях спектров начинается с их нормализации, которая заключается в вычислении площади спектра

$$S = \int_{f_н}^{f_к} a_i^2(f)df,$$

где a_i – амплитуда на i-ой собственной частоте колебаний; $f_н, f_к$ – нижняя и конечная частота собственных колебаний, вычислении среднеинтегральной амплитуды

$$A^2 = S/(f_к - f_н),$$

и нормировании всех амплитуд спектра среднеинтегральной по формуле

$$A_i^2 = a_i^2/A^2.$$

По нескольким экспериментам с одной и той же лопаткой формируется обобщенный спектр лопатки. Для оценки a_{is} – i-ой составляющей обобщенного спектра использовались помехоустойчивые робастные оценки, где строится итерационный процесс робастного взвешивания с медианой в качестве начального приближения искомой оценки:

1. $a_{is}^{(0)} = \underset{j}{\mathrm{med}}\{a_{ij}\}, \quad j = \overline{1, M}, \quad i = \overline{1, N}.$

2. $\Delta a_{ij}^{(k)} = a_{ij} - a_{ij}^{(k-1)}.$

3. $S^{(k)} = \mathrm{MAD}\{\Delta a_{ij}^{(k)}\} = \underset{j}{\mathrm{med}}\{|a_{ij}^{(k)}|\}/0.6745.$

4. $\overline{\Delta a}_{ij}^{(k)} = \Delta a_{ij}^{(k)}/S^{(k)}.$

5. $W_{ij}^{(k)} = \psi(\overline{\Delta a}_{ij}^{(k)})/|\Delta a_{ij}^{(k)}|.$

6. $a_{is}^{(k+1)} = \sum_{j=1}^{M} W_{ij}^{(k)} a_{ij} / \sum_{j=1}^{M} W_{ij}^{(k)}.$

7. Повторять п. п. 2 - 6 до сходимости:

$$|(a_{is}^{(k+1)} - a_{is}^{(k)})| \le \alpha,$$

где α – малое число (например, 0.001).

8. Повторять п. п. 1 - 7 для $i = 1, N$.

Здесь k – порядковый номер итерации; $\Delta a_{ij}^{(k)}$ – невязка амплитуды относительно текущей оценки амплитуды эталона; $S^{(k)}$ – робастная оценка разброса невязок; $\Delta a_{ij}^{(k)}$ – нормированная невязка; $W_{ij}^{(k)}$ – вес амплитуды a_{ij}; MAD – медиана абсо-

Значения критерия ранговой суммы Уилкоксона–Имана

Номер лопатки	Значение критерия	Описание дефекта
10620	1.00	Бездефектная
11801	0.98	»
16971	1.80	»
16970	0.98	»
11258	−2.00	»
11509	0.98	»
10537	0.58	»
10538	0.85	Бездефектная
19966	4.55	Сквозная трещина по выходной кромке пера длиной 6 мм
19769	3.53	Сквозная трещина по выходной кромке пера длиной 4 мм
19965	3.56	Сквозная трещина под бандажем длиной 8 мм
13071	3.20	Трещина на выходной кромке пера длиной 10 мм
12040	4.5	Изменение сечения пера лопатки

лютных отклонений. Целевой функцией служит функция влияния известной оценки ТЬЮКИ:

$$\psi(x) = \begin{cases} x\,[1-(x/a)^2]^2, & |x| \le a, \quad a = 6.0 \\ 0, & |x| > a. \end{cases}$$

Применение изложенного подхода обеспечило повышение надежности формирования спектра исследуемого изделия (за счет обобщения в нем повторяющихся особенностей анализируемых спектров и исключения влияния случайных факторов). Этим же методом формируется спектр исправной лопатки, названный эталонным.

Использование критерия ранговой суммы Уилкоксона–Имана осуществляется по следующему алгоритму:

I. Спектры эталонного и контролируемого изделий – $A_s = \{a_{is}\}$ и $A = \{a_i\}$ соответственно интерпретируются как две случайные выборки (N – число дискретных частот в спектре).

II. Принимаются допущения: а) $a_{is} = e_i$, $a_i = e_i + \Delta$, где e_i – ненаблюдаемые случайные величины; Δ – интересующий нас неизвестный сдвиг в положении, обусловленный дефектом проверяемого изделия; б) все e_i взаимно независимы; в) все e_i принадлежат одной непрерывной совокупности.

III. Проверяется гипотеза H_0: $\Delta = 0$.

1. Смесь чисел $\{a_{is}\} \cup \{a_i\}$ упорядочивается по возрастанию и обозначается ранг в этом вариационном ряду.

2. $W = \sum_{i=1}^{N} r_i$.

3. $W^* = [W - N(2N+1)/2]/(N^2(N+1)/2)^{1/2}$.

4. $J = W^*/2[1 + ((2N-2)/(2N-1-(W^*)^2)^{1/2}]$.

5. Строится двусторонний симметричный доверительный интервал для уровня значимости $\alpha = \alpha_1 + \alpha_2$, $\alpha_1 = \alpha_2 = \alpha/2$,

$$J(\alpha, n) = (Z_\alpha + U_\alpha(n-1))/2,$$

где Z_α – α – квантиль стандартного нормального распределения $N(0, 1)$; U_α – то же для распределения Стьюдента с $(n-1)$ степенями свободы.

6. Если не выполняется условие $J(\alpha_1, n) < J < J(1-\alpha, n)$, то делается вывод о существенных отличиях в анализируемых спектрах, т.е. о наличии дефекта в контролируемом изделии.

Площадь спектра рассчитывается численным интегрированием по методу Симпсона [6] по формуле

$$S = \int_0^{f_{\text{гр}}} a_i^2(f)\,df,$$

где $a_i(f)$ – амплитуда колебаний; f – частота колебаний, вычисляется.

Статистика амплитуд вычисляется по формуле

$$A = \sum_{i=1}^{N} \lg(a_i/a_{is}),$$

где a_i – амплитуда на i-ой частоте текущего спектра; a_{is} – то же для эталонного спектра.

Для каждой целевой функции строится доверительный интервал с доверительной вероятностью 0.95.

В результате сравнительного анализа амплитудных спектров контролируемых изделий с эталонным с использованием данных целевых функций по нахождению значения функции в пределах доверительного интервала или за его пределами, делается вывод об исправности или дефектности лопаток и предположительном виде дефекта.

С применением данного метода проведена серия экспериментов с дефектными и исправными рабочими и сопловыми лопатками турбины и рабочими лопатками компрессора авиационного двигателя НК-8-2У. Объекты исследования прошли все виды штатного неразрушающего контроля и классифицированы по видам дефектов. По результатам экспериментов был сделан вывод об однозначном определении с помощью метода акустических характеристик трещин длиной от 4 мм и более, внутренних дефектов типа несплошность материала, утонение, изменение геометрии пера лопатки, изменение структуры материала. В таблице приведены значения функции ранговой суммы Уилкоксона–Имана для исправных и дефектных лопаток *1* ступени турбины двигателя НК-8-2У, указаны номера лопаток и вид дефекта. Из таблицы видно различие в значениях целевых функций для исправных и дефектных лопаток. На основании экспериментальных исследований создан словарь диагностических признаков для рабочих лопаток компрессора двигателя НК-8-2У, в котором указаны соответствие определенного дефекта и целевой функции, наиболее эффективно выявляющей этот дефект.

Данный метод определения технического состояния лопаток турбины и компрессора ТРД является объективным, требующим минимальных затрат времени для контроля, экономичным, экологически чистым и безвредным для обслуживающего персонала. Он может дополнить или заменить ряд традиционных методов неразрушающего контроля и позволит обеспечить большую надежность дефектации элементов ТРД, в том числе в условиях эксплуатации без демонтажа двигателя с крыла самолета. Диагностика лопаток двигателя на крыле самолета требует дополнительных экспериментальных работ, новых устройств, учета внешних факторов и т.д. Для осуществления такой диагностики в одном из проектных бюро машиностроения разработан манипулятор, посредством которого к лопаткам двигателя через технологические лючки и окна могут доставляться малогабаритный акустический преобразователь и специальный ударник со следящей системой. Такой контроль технического состояния позволит повысить безопасность полета самолетов, а также многократно снизить необходимые для контроля трудозатраты, а следовательно и стоимость диагностических работ, исключить субъективность в принятии решения, позволит получать информацию о состоянии объекта в документальной форме.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Вибрация в технике. Справочник в 6-ти томах. Под ред. Челомей В.Н. М.: Машиностроение, 1980. Т. 3, 5.
2. Конструкция и проектирование авиационных газотурбинных двигателей. Под ред. Хронина Д.В. М.: Машиностроение, 1989. 564 с.
3. *Лозовский А.В., Бондал Г.В., Каксис А.О., Колтунов А.Е.* Диагностика авиационных двигателей. М.: Машиностроение, 1988. 280 с.
4. *Баранов В.М.* Акустические измерения в ядерной энергетике. М.: Энергоатомиздат, 1990. 320 с.
5. *Глаговский Б.А., Московенко И.Б.* Низкочастотные акустические методы контроля в машиностроении. Л.: Машиностроение, 1977. 280 с.
6. *Поллард Дж.* Справочник по вычислительным методам статистики: Пер. с англ. Занадворова В.С. Под ред. Четыркина Е.М. М.: Финансы и статистика, 1982. 244 с.
7. *Ликеш И., Ляга Й.* Основные таблицы математической статистики: Пер. с чешского Данилова Ю.А. М.: Финансы и статистика, 1985. 356 с.

Diagnostics of Gas-Turbine Engines by Acoustic Sensing of their Components

E. V. Belov, Yu. V. Van'kov, I. V. Ivshin, A. V. Kochergin, D. N. Pervukhin, and A. P. Tunakov

Practical applications of the method of acoustic characteristics to determining the state of components of a gas-turbine engine are reported. The new approach is compared with other methods of nondestructive testings used in the aircraft industry. The underlying mathematical formalism and the test setup are described.