

Предлагаемый способ контроля состояния рабочих лопаток может быть использован, во-первых, при подборе частотных характеристик рабочих лопаток на колесе для получения оптимальных динамических характеристик. Он имеет явные преимущества перед статическими методами, которые не учитывают реальных условий заделки лопаток и условий их работы.

Измерение частоты собственных колебаний каждой лопатки рабочего колеса на работающем двигателе позволяет также выделить любые дефекты, которые вызывают изменение жесткостно-массовых характеристик лопатки (трещины, забоины и др. механические повреждения, износ или заклинка замка и т. д.). При этом может быть реализован и способ диагностирования состояния рабочей лопатки по изменению величины резонансных оборотов по наработке.

ЛИТЕРАТУРА

1. Тойбер М. Л. и др. Надежность и долговечность авиационных газотурбинных двигателей. Киев, КИИГА, 1975, № 2.
2. Дорошко С. М., Тойбер М. Л. Вопросы динамики и прочности. Рига, «Зинатне», 1973, № 25.
3. Заблоцкий И. Е., Коростелев Ю. А. «Энергомашиностроение», 1970, № 1.

УДК 629.7.036.3.083.03

*А. С. Ермилов, Е. А. Коняев, В. С. Окороков,
Е. В. Чеховид*

НЕКОТОРЫЕ ВОПРОСЫ ВИБРОАКУСТИЧЕСКОЙ ДИАГНОСТИКИ ДВИГАТЕЛЯ АИ-25

При решении задач виброакустической диагностики технического состояния двигателя АИ-25 возникла проблема выбора исходного эталонного спектра исправного двигателя, с которым сравнивались бы текущие спектры. Предварительная проверка однородности спектров партии из шести исправных двигателей методом однофакторного дисперсионного анализа по F -критерию (критерию Фишера) на ряде основных частот [1] в диапазоне 20--20000 Гц показала, что они обладают существенной неоднородностью. Это исклю-

часть возможность применения единого эталонного спектра исправного двигателя. Для каждого конкретного двигателя необходим свой исходный эталонный виброакустический спектр.

Экспериментальное исследование виброакустических характеристик проводилось на стенде на двигателе АИ-25, имевшем наработку 475 ч. Акселерометры устанавливались (рис. 1): А1 — внутри двигателя на корпусе шарикоподшипника компрессора НД; А2 — снаружи на разделительном корпусе, А3 — на корпусе турбины. Микрофоны М1 и М2 размещались вблизи разделительного корпуса и корпуса турбины.

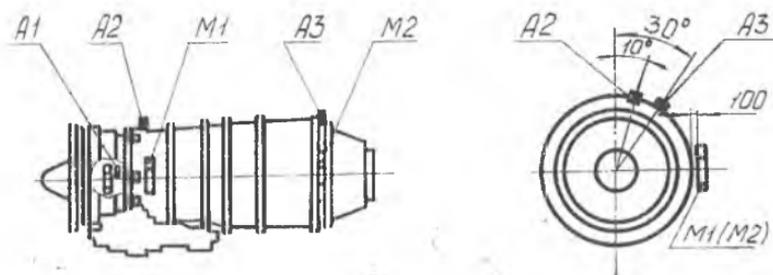


Рис. 1. Схема размещения преобразователей на двигателе

При исследовании виброакустических характеристик проводился узкополосный частотный анализ с шириной полосы пропускания соответственно 2,5 и 10 Гц в диапазоне частот 20—5000 и 5000—20000 Гц.

В процессе исследования для получения неисправных состояний в узлы компрессора, камеру сгорания, турбину вводились следующие дефекты:

К1 — дисбаланс ротора компрессора НД, $\delta = 108 \cdot 10^{-4}$ Н·м;

К4 — подрез лопатки первой ступени компрессора НД, $\delta = 108 \cdot 10^{-4}$ Н·м;

Т — подрез лопатки второй ступени турбины НД, $\delta = 121 \cdot 10^{-4}$ Н·м;

Ф1 — отключение одной топливной форсунки камеры сгорания.

Регистрация виброакустических спектров в исправном и неисправном состояниях проводилась на установившемся режиме работы, соответствующем 60% оборотов по каскаду высокого давления.

Для диагноза технического состояния двигателя применялся метод сравнения спектров при неисправных состояниях

их с исходным эталонным спектром исправного двигателя [2]. Суть этого метода:

в результате анализа нескольких реализаций создается эталонный спектр исправного двигателя, соответствующий набору средних значений амплитуд спектров на характерных частотах;

по нескольким реализациям дефектного двигателя создается эталонный средний спектр для двигателя с данным дефектом;

рассчитывается разность между эталонными спектрами исправного и дефектного двигателя и производится кодирование разностного спектра на информативных частотах;

составляется матрица распознавания, включающая набор кодированных разностных спектров для различных неисправных состояний.

К информативным частотам для каждого дефекта были отнесены те, на которых отдельные реализации дефектного двигателя давали отклонение амплитуд (по сравнению со средним значением амплитуд исправного двигателя) не менее 4 дБ.

Кодирование разностного спектра производилось по принципу:

$$\text{код} = \begin{cases} 0 & \text{при } \Delta L_i < 4 \text{ дБ;} \\ 1 & \text{при } \Delta L_i \geq 4 \text{ дБ.} \end{cases}$$

На этом 1 этап распознавания — обучение заканчивается.

Второй этап распознавания начинается с кодирования диагностируемого спектра. Само распознавание заключается в сравнении кодированных диагностируемых спектров с матрицей распознавания и вычислении расстояния до эталонных дефектных спектров, закодированных в матрице. Это расстояние равно числу несовпадающих разрядов между диагностируемым и матричным кодированным спектрами.

Таблица 1

№ за- мера	Расстояние, l_i				Коэффициент распознавания, $\xi_i (l_i^2)$			
	К1	К4	Т	Ф1	К1	К4	Т	Ф1
1	2	10	8	6	0,824	0,033	0,051	0,092
2	6	8	12	8	0,421	0,237	0,105	0,237
3	2	8	8	6	0,809	0,051	0,051	0,089

В табл. 1 для преобразователя М1 приводятся значения расстояний l_i для трех диагностируемых реализаций с дефектом К1 до эталонных дефектных спектров на информативных частотах, представленных матрицей распознавания.

Из таблицы видно, что диагностируемый спектр хорошо совпадает с матрицей дефекта К1.

В качестве меры близости диагностируемого спектра к эталонному дефектному был выбран коэффициент распознавания ξ , рассчитываемый по квадратичным расстояниям l_i :

$$\xi_1 = \frac{\left(\frac{1}{l_1}\right)^2}{\left(\frac{1}{l_1}\right)^2 + \left(\frac{1}{l_2}\right)^2 + \left(\frac{1}{l_3}\right)^2 + \left(\frac{1}{l_4}\right)^2}$$

Из табл. 1 также видно, что значения коэффициентов распознавания дефекта К1 у всех трех диагностируемых реализаций оказались выше значения коэффициента распознавания других состояний: К4, Т, Ф1.

Если задаться уровнем распознавания $\xi \geq 0,8$, то реализации 1 и 3 следует отнести к реализациям двигателя, имеющего дефект К1, а по реализации 2 следует отказ от распознавания.

При переходе к другим преобразователям изменится число информативных частот и величина сигнала. Поэтому матрицы распознавания будут иметь другой вид, т. е. один и тот же дефект фиксируется разными датчиками с различным количеством информативных частот.

В табл. 2 применительно к преобразователю М1 представлены коэффициенты распознавания всех реализаций спектров неисправных состояний двигателя К4, Т, Ф1.

Данные табл. 1, 2 свидетельствуют о том, что с большей

Таблица 2

Дефект	№ замера	$\xi (l_i^2)$			
		К1	К4	Т	Ф1
К4	1	0,012	0,964	0,012	0,020
	2	0,008	0,972	0,008	0,012
Т	1	0,134	0,165	0,536	0,165
	2	0,138	0,062	0,554	0,246
	3	0,052	0,027	0,829	0,092
	4	0,131	0,079	0,711	0,079

Продолжение табл. 2

Дефект	№ за- мера	$\xi(I_i^2)$			
		K1	K4	T	Ф1
Ф1	1	0,037	0,012	0,019	0,932
	2	0,340	0,067	0,111	0,218
	3	0,182	0,046	0,046	0,727
	4	0,190	0,190	0,429	0,190

вероятностью диагностируются две из трех реализаций с дефектом K1, обе реализации с дефектом K4, одна из четырех реализаций с дефектом T, одна из четырех реализаций с дефектом Ф1. Таким образом, используя информацию, получаемую только с преобразователя M1, можно уверенно диагностировать лишь состояние K4.

Аналогичный процесс распознавания был проведен со всеми имеющимися реализациями спектров, поступивших с преобразователей A1, A2, A3, M2.

Анализ полученных результатов показал, что с помощью одного преобразователя нельзя распознать все вводимые дефекты. Более того, дефекты T и Ф1 вообще диагностируются лишь условно, т. е. по максимальному коэффициенту распознавания ξ .

Надежность распознавания можно повысить, если ту же методику распознавания применить не к одному, а к группе преобразователей. В табл. 3 такой подход применен к обобщенной информации, поступающей с преобразователей M1 и M2. Приведенные значения коэффициентов распознавания показывают, что двумя преобразователями M1 и M2 уверенно диагностируются состояния T и Ф1. Преобразователи A2, A3, M1 позволяют уверенно диагностировать дефекты K4 и T; преобразователи A1, A2, M1 — состояния K1 и K4.

Таблица 3

№ замера	Преобразователи M1 и M2							
	введен дефект T				введен дефект Ф1			
	I_i		$\xi_i(I_i^2)$		I_i		$\xi_i(I_i^2)$	
	T	Ф1	T	Ф1	T	Ф1	T	Ф1
1	0	12	1,0	0	15	3	0,038	0,962
2	1	12	0,993	0,007	14	3	0,044	0,956
3	2	11	0,968	0,032	13	4	0,086	0,914

№ замера	Преобразователи М1 и М2							
	введен дефект Т				введен дефект Ф1			
	l_i		$\xi_i(l_i)^2$		l_i		$\xi_i(l_i)^2$	
	Т	Ф1	Т	Ф1	Т	Ф1	Т	Ф1
№ замера	Преобразователи А2, А3 и М1							
	введен дефект К4				введен дефект Т			
	К4	Т	К4	Т	К4	Т	К4	Т
	К4	Т	К4	Т	К4	Т	К4	Т
1	7	15	0,821	0,179	19	7	0,120	0,880
2	1	19	0,997	0,003	17	3	0,030	0,970
№ замера	Преобразователи А1, А2, М1							
	введен дефект К1				введен дефект К4			
	К1	К4	К1	К4	К1	К4	К1	К4
	К1	К4	К1	К4	К1	К4	К1	К4
1	2	14	0,980	0,020	12	0	0	1,0
2	5	9	0,764	0,236	12	0	0	1,0

Как видно из табл. 3, надежность распознавания неисправных состояний с помощью группы преобразователей значительно выше, чем при распознавании по одному преобразователю.

После осуществления процесса распознавания необходимо оценить уровень развития дефекта или степень повреждаемости. В качестве величины, оценивающей уровень развития дефекта, удобно применить функцию потенциала

$$\Phi = \frac{1}{1 + 100 \sum (\Delta g)^2 l_i}$$

где $\Delta g_i = |\bar{g}_u - \bar{g}_i|$ — разность между средним значением виброускорения исправного двигателя и виброускорением дефектного двигателя.

В табл. 4 приведены значения потенциала, рассчитанные по показаниям преобразователей А1 и А2 для трех уровней дисбаланса от грузиков и двух уровней от подреза рабочей лопатки 1 степени компрессора НД.

Т а б л и ц а 4

Потенциал	Дисбаланс от грузиков, Н·м×10 ⁴			Подрез лопатки, Н·м×10 ⁴	
	$\delta = 79$	$\delta = 158$	$\delta = 266$	$\delta = 107$	$\delta = 291$
Ф	0,653	0,292	преобразователь А1		
			0,013	0,109	0,089
Ф	0,671	0,617	преобразователь А2		
			0,0234	0,808	0,143

Как видно из табл. 4, значения потенциала Φ хорошо отражают развитие указанных дефектов.

Таким образом, изложенная методика распознавания позволяет надежно диагностировать все исследованные дефекты двигателя АИ-25.

ЛИТЕРАТУРА

1. Смирнов Н. В., Дунин-Барковский И. В. Курс теории вероятностей и математической статистики. М., «Наука», 1969.
2. Биргер И. А. К математической теории технической диагностики. В сб.: «Проблемы надежности в строительной механике». Вильнюс, 1968.

УДК 593.3:624.074.4

Г. Г. Карташов, И. Д. Степаненко

К УТОЧНЕННОЙ ТЕОРИИ АНИЗОТРОПНЫХ
МНОГОСЛОЙНЫХ ОБОЛОЧЕК

Обоснованию линейной теории упругих многослойных оболочек (как классической, так и уточненной) уделялось большое внимание [1]—[5], [7]. Данный материал является продолжением работы [5].

Рассматривается дискретно-однородная, многослойная оболочка произвольной формы и переменной толщины, причем отдельные слои оболочки имеют различную кривизну.