

II. Seide P. An Improved Approximate Theory for the Bending of Laminated Plates // Mech. Today. Oxford e.n. - 1980. - Vol. 5. - p. 451-456.

УДК 629.7.036.017.1

В.А.Кочуров, Н.И.Епишев, В.П.Кажаев

#### АНАЛИЗ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПАРАМЕТРИЧЕСКОГО МЕТОДА ДИАГНОСТИКИ ПРИ СТЕНДОВЫХ ИСПЫТАНИЯХ

В процессе стендовых испытаний ГТД отклонения контролируемых параметров от заданных значений могут быть вызваны как конструктивно-технологическими факторами, так и появлением неисправностей в проточной части, аналогичных эксплуатационным. Часто встречающейся неисправностью при испытаниях, особенно длительных, является загрязнение проточной части [1]. Ему, как правило, подвергаются направляющие лопатки первых и средних ступеней.

В статье рассматривается возможность определения места неисправности проточной части, возникшей при стендовых испытаниях, с использованием метода диагностики по ограниченному числу измеряемых параметров, разработанного авторами для применения в условиях эксплуатации [2]. При стендовых испытаниях измеренется большее количество термодинамических параметров, чем в эксплуатации, поэтому имеется возможность, варьируя их составом и числом при постановке диагноза, определить достаточный их набор для однозначного выявления неисправного узла.

Теоретической основой метода является математическая модель, составленная в предположении, что при неисправности узла происходит изменение двух его параметров состояния. У турбины наблюдается смещение характеристики КПД на величину ( $\sigma_{\eta}$ ) и изменение пропускной способности ( $\sigma_A$ ), у компрессора - смещение характеристики КПД ( $\sigma_{\eta}$ ) и напорной характеристики ( $\sigma_A$ ) [2].

Вероятность того, что данный комплекс измеряемых параметров вызван неисправностью  $i$ -го узла проточной части, определялась по урав-

полю [2].

$$P(K^*/D_i) = \frac{Q e^{-\frac{1}{2} \sum_{j=1}^m (z_j^* - z_j^0)^2}}{(2\pi)^m} \iint_{S_i} e^{-\frac{1}{2} (a_1 x_1 + a_2 x_2 + a_3 x_1 x_2)} dx_1 dx_2, \quad (1)$$

где  $S_i$  - область изменения величин  $\sigma_{\mathcal{L}_i}$  и  $\delta A_i$  при неисправности  $i$ -го узла;

$Q$  - коэффициент пропорциональности между элементарными площадями области  $S$  и области изменения измеряемых параметров при неисправности  $i$ -го узла;

$$a_1 = \sum_{j=1}^m \frac{a_j \sigma_{\mathcal{L}_i}}{\sigma_j}; \quad a_2 = \sum_{j=1}^m \frac{a_j A_i}{\sigma_j}; \quad a_3 = \sum_{j=1}^m \frac{a_j \sigma_{\mathcal{L}_i} a_j A_i}{\sigma_j^2}; \quad x_1 = \sigma_{\mathcal{L}_i} - \sigma_{\mathcal{L}_i}^0;$$

$$x_2 = \delta A_i - \delta A_i^0; \quad z_j^* = \sigma Y_j^* / \sigma_j; \quad z_j^0 = \sigma Y_j^0 / \sigma_j;$$

$a_j \sigma_{\mathcal{L}_i}; a_j A_i$  - коэффициенты влияния параметров состояния  $i$ -го узла на  $j$ -й измеряемый;

$\sigma_j$  - средняя квадратическая погрешность измерения  $j$ -го параметра;

$\sigma Y_j^*$  - относительное отклонение  $j$ -го измеряемого параметра;

$\sigma Y_j^0$  - наиболее вероятное отклонение  $j$ -го параметра;

$\sigma_{\mathcal{L}_i}^0; \delta A_i^0$  - наиболее вероятные отклонения параметров состояния;

$m$  - число измеряемых параметров.

Величины  $\sigma_{\mathcal{L}_i}^0$ ,  $\delta A_i^0$  и  $\sigma Y_j^0$  определяются путем решения методом наименьших квадратов системы уравнений:

$$\sigma_j = \frac{\sigma Y_j^*}{\sigma_j} - \left( \frac{a_j \sigma_{\mathcal{L}_i}}{\sigma_j} \sigma_{\mathcal{L}_i} + \frac{a_j A_i}{\sigma_j} \delta A_i \right), \quad j = 1, m,$$

где  $\sigma_j$  - невязка между измеренным и расчетным значением  $j$ -го параметра при принятии гипотезы о неисправности  $i$ -го узла.

Вероятность  $P(K^*/D_i)$  определяется после приведения квадратической формы в показателе подынтегрального выражения к каноническому

виду и численного интегрирования по области  $S$  [3]. Вероятность неисправности  $i$ -го узла при данной реализации комплекса  $A^*$  определялась по формуле Байеса.

Описанный метод позволяет проводить диагностирование с использованием любого числа измеряемых параметров, не меньшего трех.

По этому методу проведено диагностирование трех трехвалвных ТРДД, у которых произошло отклонение измеряемых параметров после промывки проточной части. В табл. I представлены относительные величины этих отклонений, рассчитанные по значениям параметров до и сразу после промывки. Таким образом, на величины изменений параметров не повлияли другие возможные неисправности, кроме загрязнения. Для постановки диагноза отклонения параметров взяты с обратным знаком.

Т а б л и ц а I

№ двигателя	$\delta P_{сд}$	$\delta P_{вд}$	$\delta T_{тнд}^*$	$\delta P$	$\delta P_{квд}^*$
1	-1,399	-1,346	-2,678	2,04	1,866
2	-1,066	-0,414	-0,857	2,04	0,746
3	-0,662	-0,621	-0,857	1,362	0,933

В качестве возможных неисправных узлов проточной части рассматривались вентилятор (Вн), компрессоры среднего (КСД) и высокого (КВД) давления, турбины высокого (ТВД), среднего (ТСД) и низкого (ТНД) давления.

Так как загрязнению подвержены в основном лопатки первых ступеней компрессора, наиболее вероятным неисправным узлом представленных двигателей должен являться вентилятор. При диагностировании с использованием всех пяти измеряемых параметров вероятность неисправности этого узла у первого, второго и третьего двигателей составляет 0,989, 0,952 и 0,756 соответственно. Таким образом, по пяти измеряемым параметрам можно практически однозначно определить действительно неисправный узел.

Представляет интерес возможность выявления такой неисправности, как загрязнение проточной части, по отклонениям штатных измеряемых параметров ( $P_{сд}$ ,  $P_{вд}$ ,  $T_{тнд}^*$ ). Результаты диагностирования по этим параметрам приведены в табл. 2. Узлы, вероятность неисправности

которых меньше 0,1, исключены из рассмотрения. Как видно из таблицы, однозначно выявить загрязнение по отклонениям штатных измеряемых параметров практически невозможно, так как вероятность неисправности вентилятора мала.

В результате диагностирования по различным наборам отклонений измеряемых параметров выявлено, что комплекс  $K = \{\sigma_{псд}, \sigma_{пвд}, \sigma_{тнд}, \sigma_{тнд}^+, \sigma_{тнд}^-\}$  позволяет так же, как и полный их набор, практически однозначно определить неисправный узел (табл. 3).

Т а б л и ц а 2

№ двигателя	Узел	Вероятность неисправности	Отклонение параметров состояния	
			$\sigma_2$	$\sigma_A$
1	Вн	0,113	-3,73	-0,84
	КСД	0,638	-4,06	-2,59
	КВД	0,138	-3,32	-2,72
	ТНД	0,111	-5,32	-0,57
2	КСД	0,464	-1,36	-1,52
	КВД	0,148	-1,08	-0,86
	ТНД	0,283	-1,66	0,27
3	КСД	0,411	-1,42	-1,10
	КВД	0,280	-1,07	-1,10
	ТНД	0,181	-1,79	-0,05

Т а б л и ц а 3

№ двигателя	Узел	Вероятность неисправности	Отклонение параметров состояния	
			$\sigma_2$	$\sigma_A$
1	Вн	0,944	-2,183	-2,99
2	Вн	0,935	-0,01	-2,64
3	Вн	0,642	-0,37	-1,79
	КСД	0,183	-1,42	-1,10
	КВД	0,125	-1,07	-1,10

Диагностирование по другим комплексам, включающим отклонения четырех параметров, как и диагностирование по штатным параметрам, не позволяет определить неисправность вентилятора как наиболее вероятную.

В результате обработки статистики по отклонениям параметров состояния при неисправностях каскадов компрессора среднего и высокого давления обнаружено, что дефекты первых и последних ступеней по-разному влияют на соотношение смещений напорной характеристики и КПД. При дефектах последних ступеней изменение напорной характеристики в среднем в три раза меньше изменения КПД, а при дефектах первых - в три раза больше. При дефектах всей проточной части каскада компрессора изменение обоих параметров состояния примерно одинаково.

Загрязнению, как уже отмечалось, подвержены в основном первые ступени. Следовательно, смещение напорной характеристики при этой неисправности должно быть не меньше, чем смещение характеристики КПД. Такое соотношение изменения параметров состояния обнаружено в результате диагностирования трех исследуемых двигателей.

Итак, описанный выше метод позволил определить с учетом дополнительной информации такую причину отклонения измеряемых параметров в процессе стендовых испытаний, как загрязнение проточной части. При этом информация, полученная измерением только штатных параметров, недостаточна для однозначного выявления загрязнения как наиболее вероятной неисправности. Увеличение числа измеряемых параметров повышает достоверность диагноза, причем существует возможность однозначного определения неисправности по четырем измеряемым параметрам. Для выявления загрязнения таким набором является  $K^x = \{\sigma_{\eta_{сд}}, \sigma_{\eta_{вд}}, \sigma_{\eta_{нд}}, \sigma_{\eta_{р}}\}$ .

#### Библиографический список

1. Изменение характеристик осевой ступени вследствие загрязнения после длительной, 100-часовой наработки /Г.Н.Зверева, Н.М.Савкин. Тех.справка № Ю632. - М.:ЦИАМ, 1986. - 20с.

2. Епишев Н.И., Кочуров В.А. Метод поузловой диагностики ГД при ограниченном объеме исходной информации //Вибрационная прочность и надежность двигателей и систем летательных аппаратов: Сб.науч.тр.-Куйбышев: КуАИ, 1987. - С.67-72.

3. Вентцель Е.С. Теория вероятностей. - М.:Наука, 1969. - 576 с.