

Кочуров В.А.

## ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ РАЗЛИЧНЫХ КОМПЛЕКСОВ ИЗМЕРЯЕМЫХ ПАРАМЕТРОВ НА ДОСТОВЕРНОСТЬ ДИАГНОСТИРОВАНИЯ

При оценке технического состояния авиационных газотурбинных двигателей (ГТД) с использованием регистрируемых в полете термогазодинамических параметров выделяются две диагностические задачи, отличающиеся глубиной контроля:

- комплексная оценка работоспособности проточной части (двигателя в целом);
- локализация места неисправности с точностью до узла (съёмного модуля).

Большое значение для своевременного и достоверного определения фактического технического состояния (работоспособен – неработоспособен) и причины неработоспособности имеет точность измерения и оценки изменений термогазодинамических параметров, а также сама номенклатура измеряемых параметров (ИП).

Очевидно, что для решения первой задачи наиболее ценными являются ИП, имеющие максимальную чувствительность к любому изменению характеристик элементов и узлов проточной части, связанным с появлением в них дефектов. Если в качестве параметров состояния (ПС) узла проточной части (каскада компрессора или турбины) принять две величины – КПД и параметр производительности (напорность – для компрессора и пропускную способность – для турбины), то диагностическую ценность ИП можно определить по силе их реакции на изменение этих ПС, которая характеризуется коэффициентом влияния параметра состояния на данный измеряемый. Тогда диагностическую ценность измеряемого параметра  $Y_i$  для выявления неисправности, влияющей на изменение параметра состояния  $X_j$ , можно определить по выражению:

$$\psi_j(Y_i) = a_{ij} \delta X_j,$$

где  $a_{ij}$  - коэффициент влияния ПС  $X_j$  на ИП  $Y_i$ ;

$$\delta X_j = \frac{X_j - X_{j0}}{X_{j0}} * 100 \% - \text{относительное отклонение параметра состояния } X_j;$$

$X_{j0}$  – значение ПС, соответствующее исправному состоянию узла.

Диагностическая ценность параметра  $Y_i$  для оценки состояния всей проточной части ГТД в целом:

$$\psi(Y_i) = \sum_{j=1}^N a_{ij} \delta X_j,$$

где  $N$  – количество параметров состояния.

Для учета неравной точности измерения различных термогазодинамических параметров величину  $\psi(Y_i)$  необходимо нормировать:

$$\Psi(Y_i) = \frac{\psi(Y_i)}{D(Y_i)}, \quad (1)$$

где  $\Psi(Y_i)$  – нормированное значение диагностической ценности параметра  $Y_i$ ;

$D(Y_i)$  – дисперсия оценки параметра  $Y_i$  при данной системе его измерения и регистрации.

По выражению (1) определена диагностическая ценность измеряемых термогазодинамических параметров трехвального двухконтурного ГТД со смешением потоков. Рассматривались следующие параметры:

$P_{квд}, T_{квд}$  – давление и температура воздуха за компрессором высокого давления;

$P_{тнд}, T_{тнд}$  – давление и температура газа за турбиной низкого давления;

$n_{сд}, n_{вд}$  – частота вращения роторов среднего и высокого давлений;

$G_T$  – расход топлива.

Результаты приведены в таблице 1.

Таблица 1

Параметр $Y_i$	$P_{квд}$	$T_{квд}$	$n_{сд}$	$n_{вд}$	$G_T$	$P_{тнд}$	$T_{тнд}$
$\psi(Y_i)$	0,872	2,046	2,427	1,791	3,926	1,307	4,948
$\Psi(Y_i)$	1,779	4,176	13,89	14,621	6,134	2,667	10,098

Однако эти данные нельзя считать окончательными, так как при анализе коэффициентов влияния  $a_{ij}$  обнаружилось, что один из наиболее информативных параметров  $n_{сд}$  практически не реагирует на неисправности компрессора и турбины высокого давления, зато коэффициент влияния на него ПС, характеризующего пропускную способность турбины низкого давления, на порядок больше, чем на  $n_{вд}$ . В свою очередь  $n_{вд}$  слабо реагирует на дефекты камеры сгорания и компрессора среднего давления.

Для учета этого обстоятельства произведено ранжирование по величине коэффициентов влияния каждого параметра состояния на рассматриваемые ИП. Наибольшему коэффициенту присвоен ранг 1, наименьшему, соответственно, 7. Просуммировав ранги по всем ПС, введем весовой коэффициент  $K_i = R_1 \setminus R_i$ , где  $R_1$  – наименьший суммарный ранг,  $R_i$  – суммарный ранг  $i$ -го ИП. Диагностическая ценность ИП с учетом весового коэффициента:  $\Psi_R(Y_i) = \Psi(Y_i) * K_i$ .

Таблица 2

Параметр $Y_i$	$P_{квл}$	$T_{квл}$	$n_{сд}$	$n_{вд}$	$G_T$	$P_{тнд}$	$T_{тнд}$
$\Psi_R(Y_i)$	1,562	2,592	8,435	8,355	5,258	1,906	10,098

Из таблицы 2 следует, что наиболее информативными параметрами для оценки работоспособности двигателя являются частоты вращения роторов среднего  $n_{сд}$  и высокого  $n_{вд}$  давления и температура  $T_{тнд}$  газа за турбиной. Они являются штатными измеряемыми параметрами системы контроля двигателя.

Информативность измеряемых параметров для определения (локализации) причины неисправности зависит не только от диагностической ценности  $\Psi_R(Y_i)$ , но и от метода диагностирования и взаимосвязи параметров, т.е. от математической модели рабочего процесса ГТД.

Анализ информативности указанных выше параметров был произведен с использованием метода поузловой диагностики, базирующемся на оценке вероятности принадлежности данного комплекса диагностических признаков к областям диагнозов, соответствующим неисправностям различных узлов проточной части ГТД [1]. Исходя из того, что состояние каждого узла описывается двумя параметрами состояния, то все их возможные сочетания определяют в многомерном пространстве с базисом соответствующих измеряемых параметров некоторую плоскую фигуру, ограниченную векторами, координаты которых равны соответствующим коэффициентам влияния параметров состояния на измеряемые параметры. Так как диагностирование в эксплуатации производится до наступления предельного состояния, то параметры состояния находятся в пределах, обеспечивающих нормальное функционирование двигателя. Имеющийся опыт показывает, что при наступлении предельного состояния изменения параметров состояния достигают максимальных значений порядка 6..8% [2]. С учетом такого диапазона изменения ПС неисправному состоянию каждого  $j$ -го узла проточной части

в многомерном (в данном случае  $i$ -мерном) пространстве диагностических признаков, сформированных из соответствующих измеряемых параметров, соответствует некоторый «параллелограмм», единичная площадь которого определяется векторным произведением векторов

$$s_j = |a_1'| * |a_2'| * \sin \varphi,$$

где  $a_1'$  - вектор  $(a_{11}, a_{12}, \dots, a_{1i}, \dots, a_{1m})_j$ ;

$a_2'$  - вектор  $(a_{21}, a_{22}, \dots, a_{2i}, \dots, a_{2m})_j$ ;

$a_{i1}, a_{i2}$  - коэффициенты влияния на  $i$ -й измеряемый параметр первого и второго параметра состояния  $j$ -го узла проточной части;

$m$  - количество измеряемых параметров (или диагностических признаков);

$\varphi$  - угол между векторами  $a_1'$  и  $a_2'$ .

Полная площадь параллелограмма  $S_j$  получается перемножением единичной площади  $s_j$  и заданных максимально возможных значений отклонений параметров состояния  $j$ -го узла

Вероятность принадлежности данного комплекса диагностических признаков к области диагноза, соответствующей неисправностям  $j$ -го узла проточной части (в данном случае к параллелограмму  $S_j$ ) определяется выражением

$$P(K^* / S_j) = \frac{e^{-\frac{1}{2} \sum_{i=1}^m (\delta Z_i^* - \delta Z_i^0)^2}}{(2\pi)^{\frac{m}{2}}} \iint_{S_j} e^{-\frac{1}{2} \sum_{i=1}^m (\delta Z_i^* - \delta Z_i^0)^2} dS_j,$$

где  $K^* = \{\delta Y_1^*, \delta Y_2^*, \dots, \delta Y_m^*\}$  - конкретная реализация комплекса диагностических признаков, сформированных из значений измеряемых параметров.

$\delta Y_i^* = \frac{Y_i^* - Y_{i0}}{Y_{i0}}$  - диагностический признак.

$Y_i^*$  - измеренное значение  $i$ -го параметра;

$Y_{i0}$  - значение  $i$ -го параметра, соответствующее исправному состоянию.

$\delta Z_i^* = \frac{\delta Y_i^*}{\sigma_i}$  - нормированное значение диагностического признака.

$\sigma_i$  - средняя квадратическая погрешность измерения  $i$ -го параметра;

\* - верхний индекс, соответствующий измеренным значениям параметров.

<sup>0</sup> - верхний индекс, соответствующий наиболее вероятным значениям параметров, рассчитанным по математической модели.

Вероятность неисправности  $j$ -го узла при реализации комплекса признаков  $K^*$  определяется формулой Байеса:

$$P(D_j / K^*) = \frac{P(D_j) * P(K^* / S_j)}{\sum_{j=1}^n P(D_j) * P(K^* / S_j)},$$

где  $D_j$  – диагноз о неисправности  $j$ -го узла;

$P(D_j)$  – априорная вероятность  $j$ -го диагноза;

$n$  – количество узлов проточной части.

По данному методу точку «К» в  $i$ -мерном пространстве с координатами, равными значениям диагностических признаков относят с определенной вероятностью к областям (параллелограммам  $S_j$ ), соответствующим неисправным состояниям различных узлов. Особенностью метода является то, что при всех равных условиях ( $P(D_j)=idem$ ) и геометрической равноудаленности точки «К» от областей диагнозов всех узлов проточной части, величина  $P(D_j/K^*)$  будет различной для разных узлов и пропорциональна площади  $S_j$ . Таким образом, величина  $S_j$  характеризует ценность конкретного комплекса измеряемых параметров для распознавания неисправности  $j$ -го узла. Причем она зависит не только от величины коэффициентов влияния, но даже в большей степени от угла  $\varphi$ . Для оценки информативности комплекса измеряемых параметров с точки зрения определения причины неисправности (неисправного узла проточной части) введем величину  $h_j$ , оценивающую относительную величину области  $S_j$ :

$$h_j = \frac{S_j}{\sum_{j=1}^n S_j}$$

Величина  $h_j$  является фактически априорной вероятностью  $j$ -го диагноза, что влияет на достоверность результата. Следовательно, наилучшим комплексом измеряемых параметров является тот, для которого величины  $h_j$  всех узлов одинаковы или близки друг к другу.

Так как оценку технического состояния можно проводить по величине отклонения параметров состояния, важное значение имеет энтропия оценки значения ПС. В данном случае энтропия представляет меру неопределенности косвенной оценки изменения ПС с учетом погрешности измерения параметров и требуемой точности оценки. Энтропия определяется по выражению:

$$H(\delta X) = \log_2 \sqrt{2\pi e \sigma_{\Delta}^2} \frac{1}{\Delta(\delta X)},$$

где  $\sigma_{\Delta}$  - среднее квадратическое отклонение оценки ПС;

$\Delta(\delta X)$  - требуемая точность оценки ПС.

Рассмотрена величина суммарной энтропия определения двух параметров, характеризующих состояние j-го узла -  $H_j$ . Величина  $\Delta(\delta X)$  в расчетах принималась равной 1%.

Оценены величины  $h_j$  и  $H_j$  для штатного комплекса измеряемых параметров  $K = \{n_{с.д.}, n_{в.д.}, T_{т.д.}\}$  для всех узлов проточной части. Очевидно, что эти параметры взаимосвязаны и большей величине  $h_j$  должна соответствовать меньшая энтропия  $H_j$ .

Таблица 3

Узел	Вентилятор	КНД	КСД	КВД	ТВД	ТСД	ТНД
$h_j$	0,01	0,025	0,217	0,237	0,052	0,191	0,268
$H_j$	9,44	9,59	4,89	4,74	8,68	5,16	4,84

Из таблицы 3 видно, что штатных ИП недостаточно для достоверной оценки неисправности таких узлов как вентилятор, КНД, ТВД. В качестве дополнительных к штатным измеряемым были рассмотрены параметры  $G_T$  и  $T_{квд.}$ , имеющие максимальные после штатных параметров значения информативности  $\Psi_R(Y_j)$ . В таблице 4 приведены результаты расчета для комплексов  $K_1 = \{n_{с.д.}, n_{в.д.}, T_{т.д.}, G_T\}$  и  $K_2 = \{n_{с.д.}, n_{в.д.}, T_{т.д.}, T_{квд.}\}$

Таблица 4

Узел	Вентилятор	КНД	КСД	КВД	ТВД	ТСД	ТНД	
$K_1$	$h_j$	0,031	0,070	0,224	0,140	0,104	0,129	0,302
	$H_j$	7,60	6,76	4,78	5,55	6,01	5,61	4,28
$K_2$	$h_j$	0,091	0,118	0,112	0,228	0,164	0,103	0,184
	$H_j$	6,14	5,79	5,78	4,81	5,38	5,94	5,01

Из нее следует, что наилучшим набором измеряемых параметров для распознавания места неисправности является комплекс  $K_2$ , поскольку для него величины  $h_j$  ближе друг к другу, чем для комплекса  $K_1$ .

Таким образом, представленная методика позволяет оценить информативность измеряемых параметров для оценки технического состояния проточной части ГТД и дать рекомендации по их выбору для повышения достоверности результатов диагностирования.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Епишев Н.И., Кочуров В.А. Метод поузловой диагностики проточной части при ограниченном объеме информации». // Сб. научных трудов: «Вибрационная прочность и надежность двигателей и систем летательных аппаратов» / Куйбышев, Куйбышевский авиационный институт, 1987, с.69-74.
- 2 Кочуров В.А., Галкин С.Д. «Методика допускового контроля состояния ГТД по термогазодинамическим параметрам»// Сб научных трудов: «Вибрационная прочность и надежность двигателей и систем летательных аппаратов» / Куйбышев, Куйбышевский авиационный институт, 1989, с.21-25.