

Кочуров В.А., Кочуров А.В.

ВЛИЯНИЕ ПОГРЕШНОСТЕЙ ИЗМЕРЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ НА РЕЗУЛЬТАТЫ ДИАГНОСТИРОВАНИЯ ГАЗОТУРБИННОГО ДВИГАТЕЛЯ

Для оценки влияния погрешностей измерения на результаты диагностирования была использована лишнейная математическая модель рабочего процесса двухвального двухконтурного газотурбинного двигателя, с помощью которой были рассчитаны величины отклонений термодинамических параметров от нормы при дефектах различных узлов проточной части. В качестве узлов проточной части рассматривались:

- вентилятор второго контура (Вент);
- компрессор низкого давления (КНД);
- компрессор высокого давления (КВД);
- турбина высокого давления (ТВД);
- турбина низкого давления (ТНД).

В качестве параметров состояния (ПС) узла проточной части (каскада компрессора или турбины) приняты две величины – КПД и параметр производительности (напорность для компрессора и пропускная способность для турбины).

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 ПС достигают максимальных значений порядка 6..8 % [1]. Поэтому в качестве «типовой неисправности» принята такая, при которой отклонения ПС составляют 3 % от исходных значений. Такие отклонения ПС уже существенны, но объект еще не достиг предельного состояния.

В качестве диагностических параметров приняты штатные измеряемые термодинамические параметры двигателя:

- $T_{нд}$ – температура газа за турбиной низкого давления;
- $n_{нд}, n_{вд}$ – частота вращения роторов низкого и высокого давлений;
- G_f – расход топлива.

В качестве диагностических признаков приняты относительные отклонения трех параметров: $\Gamma_{\text{плд}}$, $n_{\text{вд}}$ и G_1 . Параметр $n_{\text{плд}}$ определяет режим работы двигателя и, следовательно, не может быть использован для формирования диагностического признака. Отклонения определялись по формуле:

$$\delta Y_i = \frac{Y_i - Y_{i0}}{Y_{i0}} * 100\%,$$

где Y_{i0} – значение диагностического параметра, соответствующее исправному состоянию узла;

Y_i – текущее (измеренное или полученное по математической модели) значение диагностического параметра.

В качестве метода диагностирования причины неисправности использовался метод узловых диагностики, базирующийся на оценке вероятности принадлежности данного комплекса диагностических признаков к областям диагнозов, соответствующим неисправностям различных узлов проточной части [2].

Вероятность принадлежности данного комплекса диагностических признаков к области диагноза (S_j), соответствующей неисправностям j -го узла проточной части определяется выражением:

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

где $K^* = \{\delta Y_1^*, \delta Y_2^*, \dots, \delta Y_m^*\}$ – конкретная реализация комплекса диагностических признаков;

$\delta Z_i = \frac{\delta Y_i}{\sigma_i}$ – нормированное значение диагностического признака;

σ_i – средняя квадратическая погрешность измерения i -го параметра;

i – верхний индекс, соответствующий измеренным значениям параметров;

i^0 – верхний индекс, соответствующий наиболее вероятным значениям параметров, рассчитанным по математической модели.

Область диагноза S_j j -го узла проточной части в многомерном (в данном случае – i -мерном) пространстве диагностических признаков представляет собой некоторый параллелограмм, единичная площадь которого определяется векторным произведением векторов:

$$s_j = |a_1^j| * |a_2^j| * \sin \varphi, \quad (2)$$

где a_1^j – вектор $(a_{11}, a_{21}, \dots, a_{i1}, \dots, a_{m1})_j$;

a_2^j – вектор $(a_{12}, a_{22}, \dots, a_{i2}, \dots, a_{m2})_j$;

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);

φ – угол между векторами a_1^j и a_2^j .

Полная площадь параллелограмма S_j определяется максимально возможными значениями отклонений параметров состояния j -го узла.

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

$$P(D_j / K^*) = \frac{P(D_j) * P(K^* / S_j)}{\sum_{j=1}^n P(D_j) * P(K^* / S_j)}, \quad (3)$$

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, соответствующим неисправным состояниям различных узлов.

Этот метод диагностирования позволяет непосредственно оценить влияние погрешностей измерения на вероятность определения истинного диагноза. Для этого для каждого узла проточной части по математической модели определялись значения диагностических признаков при их «типовых неисправностях». Затем в пределах погрешностей измерения параметров для каждой «типовой неисправности» были случайным образом по нормальному закону распределения сгенерированы 1000 возможных сочетаний диагностических признаков и проведено диагностирование.

В группе из 1000 диагнозов каждой «типовой неисправности» для каждого j -го узла подсчитано количество диагнозов, в которых для него значение $P(D_j / K^*)$, определенное по выражению (3), наибольшее среди других узлов, т.е. его неисправность наиболее вероятна. Количественное и процентное соотношение таких диагнозов для всех узлов при «типовой неисправности» КВД показано на рис. 1, для «типовой неисправности» КИД – на рис. 2. Вели-

чины средних квадратических погрешностей измерения параметров для примера приняты равными единице: $\sigma_n = \sigma_T = \sigma_G = 1$.

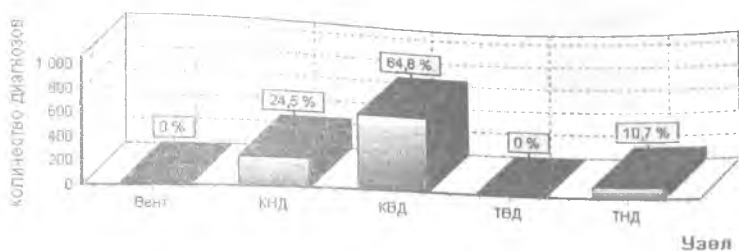


Рисунок 1 - Соотношение диагнозов при «типовой неисправности» КВД при $\sigma_n = \sigma_T = \sigma_G = 1$

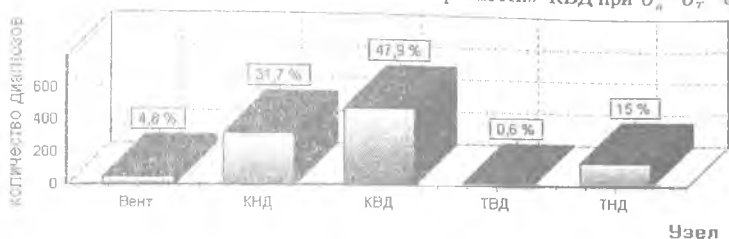


Рисунок 2 - Соотношение диагнозов при «типовой неисправности» КНД при $\sigma_n = \sigma_T = \sigma_G = 1$

Как видно из диаграмм рис. 1 и 2 заданная неисправность подтвердилась в 65 % диагнозов для «типовой неисправности» КВД, и только в 32 % для КНД. Причем в последнем случае наиболее вероятной неисправностью определена не заданная «типовая», а другая, что можно объяснить неприемлемо большими значениями погрешностей измерения. В результате обработки данных, полученных по результатам большого числа замеров параметров в эксплуатации, были определены следующие значения средних квадратических погрешностей измерения: $\sigma_n = 0,5$; $\sigma_T = 0,8$; $\sigma_G = 1,5$. Результаты диагностирования «типовой неисправности» КНД с такими значениями погрешностей представлены на рис. 3.

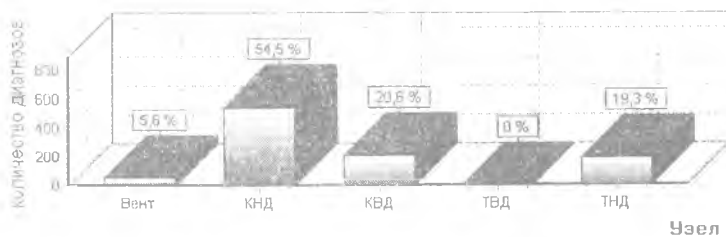


Рисунок 3 - Соотношение диагнозов при «типовой неисправности» КНД при $\sigma_n = 0,5$, $\sigma_T = 0,8$, $\sigma_G = 1,5$

Результаты диагностирования «типовых неисправностей» при средних квадратических погрешностях измерения: $\sigma_n=0,5$; $\sigma_T=0,8$; $\sigma_G=1,5$ представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Результаты диагностирования «типовых неисправностей»

Типовая неисправность	Результаты диагностирования				
	Вент.	КНД	КВД	ТВД	ТНД
Вент	91,9	8,1	0,0	0,0	0,0
КНД	5,6	54,5	20,6	0,0	19,3
КВД	0,0	19,1	66,3	0,0	14,6
ТВД	0,0	8,8	5,5	85,7	0,0
ТНД	0,0	1,2	1,6	0,0	97,2

На основе данных табл. 1 можно сделать вывод о том, что при имеющемся комплексе измеряемых параметров наименее вероятно правильное определение неисправности КНД.

Для оценки влияния параметров, формирующих существующий комплекс диагностических признаков, на достоверность результатов диагностирования была рассчитана их диагностическая ценность по выражению [2]:

$$\Psi(Y_i) = \frac{\sum_{k=1}^N a_{ik} \delta X_k}{\sigma_i} \quad (4)$$

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

δX_k – относительное отклонение параметра состояния X_k ;

N – количество параметров состояния.

Значения величины диагностической ценности каждого параметра и их комплекса для каждого узла и проточной части в целом, рассчитанные по выражению (4), приведены в таблице 2.

Таблица 2 – Диагностическая ценность измеряемых параметров

Параметр	Узел проточной части					Проточная часть
	Вент.	КНД	КВД	ТВД	ТНД	
$\rho_{вд}$	3	1,2	3,6	1,2	4,8	4,2
$T_{нд}$	4,1	1,5	2,3	1,9	2,3	3,8
G_1	4	0,6	0,8	0,6	0,4	1,6
$\{\rho_{вд}, T_{нд}, G_1\}$	11,1	3,3	6,7	3,7	7,5	9,6

2. Кочуров В.А. Оценка влияния различных комплексов измеряемых параметров на достоверность диагностирования ГГД. // Сб. научных трудов XI Всероссийского научно-тех. семинара «Управление движением и навигацией летательных аппаратов». – Самара: СГАУ, 2003. – С. 327-333.