

Кочуров В.А.

АНАЛИЗ ИНФОРМАТИВНОСТИ ИЗМЕРЯЕМЫХ ПАРАМЕТРОВ ГАЗОТУРБИННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

Выбор измеряемых параметров для диагностирования проточной части газотурбинных двигателей (ГТД) осуществляется с учетом их диагностической ценности, т.е. количества информации, которое несет наблюдение за ними для установления состояния двигателя.

Количество информации, полученное при измерении параметров, должно быть достаточным для определения характеристик состояния и работоспособности двигателя. Так как число штатных измеряемых параметров невелико, то они должны быть наиболее информативными из всего набора доступных для измерения параметров. Кроме того, информативность комплекса параметров в целом должна быть также наибольшей среди всех возможных комплексов.

Об изменении состояния двигателя судят по превышению отклонений измеряемых параметров допуска на них. На практике этот допуск назначается следующим образом:

$$\Delta y_j = \pm k * \sigma_{1j},$$

где Δy_j - допуск на отклонение измеряемого параметра Y_j ;

k – коэффициент,

σ_{1j} - средняя квадратическая погрешность измерения параметра Y_j .

Коэффициент k определяется доверительной вероятностью, с которой в пределах допуска находятся случайные отклонения параметров, связанные с погрешностью измерения. Как правило, принимается доверительная вероятность равная 0,995, для которой коэффициент k равен 3.

Если изменение параметров состояния при неисправности вызвало отклонение измеряемого параметра, не превышающего допуск, то состояние проточной части ГТД будет классифицировано как исправное, т.е. возникает ошибка первого рода – принята гипотеза об исправности неисправного объекта. Диапазон изменения параметра состояния, соответствующего ошибке первого рода, определяется соотношением:

$$|a_j * \delta X_i| < \Delta \delta y_j,$$

где $\Delta \delta y_j$ - допуск на относительное отклонение j-го параметра;

δX_i - относительное отклонение параметра состояния X_i ;

a_j - коэффициент влияния параметра состояния X_i на параметр Y_j .

Чем меньше диапазон изменения параметра состояния, тем, соответственно, больше чувствительность данного измеряемого параметра к неисправности.

Практический интерес представляет обнаружение неисправности до наступления отказа, приводящего к досрочному съему ГТД, когда отклонение параметра состояния не превысило предельного значения B_i . Тогда выражение для диагностической ценности параметра Y_j для неисправности, характеризуемой изменением параметра состояния X_i , можно записать в виде.

$$Z_{Di}(Y_j) = \lg_2(B_i / \delta X_{i,макс})$$

где $\delta X_{i,макс} = \frac{\Delta \delta y_j}{|a_{ij}|}$ - отклонение параметра состояния, приводящее к выходу измеряемого

параметра за допуск.

В случае, когда по данному измеряемому параметру можно обнаружить изменение параметра состояния только при отказе двигателя выполняется условие $\delta X_{i,макс} = |B_i|$, и диагностическая ценность такого параметра равна нулю. Следовательно, его измерение не несет полезной информации о состоянии проточной части.

Если неисправность характеризуется изменением двух параметров состояния, то их отклонения, не приводящие к выходу измеряемого параметра за допуск (ошибке первого рода), определяются соотношением:

$$|a_{j1} * \delta X_{i1} + a_{j2} * \delta X_{i2}| < \Delta \delta y_j. \quad (1)$$

Диагностическая ценность параметра Y_j для такой неисправности определяется соотношением всех возможных сочетаний отклонений параметров состояния при возникновении неисправностей, не приводящих к катастрофическим последствиям при отказе двигателя, и сочетаний их значений, при которых по данному измеряемому параметру нельзя обнаружить неисправность.

Выражение (1) можно представить в виде:

$$\begin{cases} a_{j1} \cdot \delta X_{i1} + a_{j2} \cdot \delta X_{i2} < \Delta \delta y_j; \\ a_{j1} \cdot \delta X_{i1} + a_{j2} \cdot \delta X_{i2} > -\Delta \delta y_j. \end{cases} \quad (2)$$

Решение системы неравенств (2) удобно представить графически. Значения параметров δX_{i1} и δX_{i2} , удовлетворяющих неравенствам (2), находятся между прямыми:

$$\begin{cases} \delta X_{i2} = \frac{\Delta \delta y_j}{a_{j2}} - \frac{a_{j1}}{a_{j2}} \cdot \delta X_{i1}; \\ \delta X_{i2} = -\frac{\Delta \delta y_j}{a_{j2}} - \frac{a_{j1}}{a_{j2}} \cdot \delta X_{i1}. \end{cases} \quad (3)$$

На рис. 1 область изменения величин δX_{i1} и δX_{i2} , удовлетворяющих неравенствам (2), показана штриховкой. Линии "1" и "2" соответствуют первому и второму уравнению системы (3)

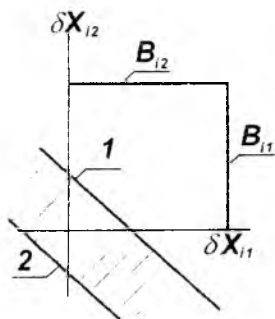


Рис. 1 Область изменения параметров состояния

Все возможные сочетания отклонений параметров состояния, не приводящие к отказу, определяются соотношениями (A_i – минимальные отклонения δX_{i1}):

$$\begin{cases} A_{i1} \leq \delta X_{i1} \leq B_{i1}; \\ A_{i2} \leq \delta X_{i2} \leq B_{i2}. \end{cases} \quad (4)$$

Область S_{iV} , удовлетворяющая неравенствам (4), ограничена прямыми.

$$\begin{cases} \delta X_{i1} = A_{i1}; \\ X_{i1} = B_{i1}; \\ X_{i2} = A_{i2}; \\ X_{i2} = B_{i2}. \end{cases} \quad (5)$$

Тогда область S_{iV} , в которой отклонения параметров состояния с учетом их возможных изменений не приводят к выходу измеряемого параметра за допуск, заключена между прямыми, заданными (3) и (4). Диагностическая ценность параметра Y_j для неисправности, характеризующейся изменением параметров X_{i1} и X_{i2} , определяется соотношением площадей S_{iV} и S_{iY} .

$$Z_D(Y_j) = \log_2 \frac{S_i}{S_{i\Delta j}}. \quad (6)$$

В случае равенства площадей S_i и $S_{i\Delta j}$, величина $Z_D(Y_j)=0$, т.е. измерение параметра Y_j не несет полезной информации для обнаружения неисправности до наступления отказа двигателя.

Диагностическая ценность комплекса параметров K^* для неисправности, характеризующейся изменением одного параметра состояния, определяется самым информативным параметром из данного комплекса. Это объясняется тем, что при изменении параметра состояния свой допуск первым превысит наиболее чувствительный измеряемый параметр, по которому и будет сделан вывод об изменении состояния двигателя.

Диагностическая ценность комплекса параметров для неисправности, характеризующейся изменением двух параметров состояния, определяется соотношением площадей областей S_i и $S_{i\Delta j}$, при изменении параметров в которой нельзя обнаружить неисправность по данному комплексу. Величина площади области $S_{i\Delta j}$ равна площади пересечения областей $S_{i\Delta j}$ для всех параметров, входящих в комплекс, так как только в этой области изменение параметров состояния не вызовет отклонения ни одного параметра из комплекса, превышающего допуск на него. За ее пределами хотя бы один параметр превысит допускаемую величину.

Область $S_{i\Delta j}$ для комплекса параметров определяется графически, путем совмещения областей $S_{i\Delta j}$ для параметров, входящих в комплекс.

Диагностическая ценность комплекса измеряемых параметров находится по формуле:

$$Z_D(K^*) = \log_2 \frac{S_i}{S_{i\Delta j}}.$$

Величина $Z_D(Y_j)$ относится только к одному диагнозу и является частной диагностической ценностью параметра Y_j . Усреднив ее по всем диагнозам, получим общую диагностическую ценность.

Для точного определения общей диагностической ценности $Z(Y_j)$ необходимо вычислить площади областей S_i и $S_{i\Delta j}$ в системе координат $(\delta X_1, \dots, \delta X_n)$, что затруднительно при большом числе параметров состояния. Но поскольку неисправность появляется первоначально в одном узле, и отклонения параметров вызваны изменением только его состояния, то величину $Z(Y_j)$ можно найти по формуле:

$$Z(Y_j) = \sum_{i=1}^m P(D_i) * Z_{D_i}(Y_j), \quad (7)$$

где m – число возможных диагнозов,

$P(D_i)$ – априорная вероятность диагноза, которую можно назначить из условия относительной опасности неисправности, или можно принять, что появление всех неисправностей равновероятно.

Аналогично находится диагностическая ценность комплекса параметров $Z(K^*)$.

Необходимые данные для оценки диагностической ценности параметров и их комплексов по изложенной методике – коэффициенты взаимного влияния параметров и погрешности их измерения – можно определить уже стадии проектирования ГТД.

По данной методике была определена информативность штатных измеряемых параметров трехвального двухконтурного ГТД с форсажной камерой, смешением потоков контуров и форсажной камерой. Штатными измеряемыми параметрами являются:

- $n_{нд}$ – частота вращения ротора низкого давления;
- $n_{сд}$ – частота вращения ротора среднего давления;
- $n_{вд}$ – частота вращения ротора высокого давления;
- $T_{тнд}$ – температура газа за турбиной низкого давления;
- $P_{вн}$ – давление за вентилятором второго контура.

В качестве возможных диагнозов рассматривались неисправности следующих узлов:

- вентилятор второго контура (Вн);
- компрессор низкого давления (КНД);
- компрессор среднего давления (КСД);
- компрессор высокого давления (КВД);
- турбина высокого давления (ТВД);
- турбина среднего давления (ТСД);
- турбина низкого давления (ТНД)

Параметры $P_{вн}$ и $n_{нд}$ определяют режим работы двигателя и их изменения не являются диагностическими признаками. В качестве диагностических признаков приняты изменения параметров $n_{сд}$, $n_{вд}$ и $T_{тнд}$

В таблице 1 представлены частные диагностические ценности параметров $n_{сд}$, $n_{вд}$ и $T_{тнд}$ для различных неисправностей, рассчитанные по формуле (6) при изменении параметров состояния в диапазоне 0..5%. Общая диагностическая ценность этих параметров, определенная по уравнению (7) при равенстве априорных вероятностей неисправностей:

$$Z(n_{сд})=1,381; \quad Z(n_{вд})=1,054; \quad Z(T_{тнд})=0,781.$$

Таблица 1. Частная диагностическая ценность параметров

$Z_{D_i}(Y_j)$	Вн	КНД	КСД	КВД	ТВД	ТСД	ТНД
$n_{сд}$	0,260	1,390	1,227	0	0	2,585	4,210
$n_{вд}$	0	0,322	0,556	1,098	2,35	2,787	0,263
$T_{тнд}$	0	0,546	0,651	1,036	2,251	0,585	0,401

В таблице 2 представлены частные диагностические ценности комплекса измеряемых параметров. Общая диагностическая ценность $Z(K)=2.32$.

Таблица 2. Частная диагностическая ценность комплекса измеряемых параметров

	Вн	КНД	КСД	КВД	ТВД	ТСД	ТНД
$Z_{D_i}(K)$	0,260	1,390	2,211	2,370	2,836	2,963	4,210

Как видно из таблицы 2, диагностическая ценность признака $n_{сд}$ для неисправностей КВД и ТВД равна нулю, а для неисправностей других узлов она больше, чем у $n_{вд}$ и $T_{тнд}$.

В целом же диагностическая ценность комплекса измеряемых параметров для неисправности вентилятора второго контура практически равна нулю. Это значит, что неисправность этого узла невозможно обнаружить по изменению штатных параметров.

Результаты расчета диагностической ценности других возможных комплексов параметров: $K_1=\{T_{квд}, n_{вд}, T_{тнд}\}$ и $K_2=\{p_{квд}, n_{вд}, T_{тнд}\}$ приведены в таблице 3. В качестве дополнительных рассматривались наиболее информативные параметры: $T_{квд}$ – температура за компрессоров высокого давления и $p_{квд}$ – давление за компрессоров высокого давления.

Таблица 3. Частные диагностические ценности комплексов измеряемых параметров

	Вн	КНД	КСД	КВД	ТВД	ТСД	ТНД
$Z_{D_i}(K_1)$	0	0,546	0,651	2,370	2,836	2,920	0,963
$Z_{D_i}(K_2)$	0	0,546	0,651	2,370	3,263	2,920	1,956

Как показал анализ, имеющийся штатный комплекс измеряемых параметров является наиболее информативным среди различных комплексов, состоящих из трех параметров.