

УДК 629.7.036.3

В. С. ГАБДУЛЛИН

ВЕРОЯТНОСТНАЯ ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ ПАРАМЕТРИЧЕСКОГО ДИАГНОСТИРОВАНИЯ СОСТОЯНИЯ АВИАЦИОННЫХ ГТД

Рассматривается метод оценки эффективности параметрического диагностирования состояния авиационных ГТД оцениваемой вероятностью распознавания дефектного состояния. Оценка проводится в два этапа. На первом этапе определяются функции распределения и доверительные границы критериев дефектов (параметров состояния) ГТД. На втором этапе оценивают эффективность существующих методов идентификации состояния. За окончательный принимается метод с наибольшей вероятностью распознавания. *Авиационный ГТД ; параметрическая диагностика состояния ; функция цели ; контролируемые параметры ; идентифицируемые параметры*

Среди неисправностей и отказов ГТД значительную часть составляют параметрические, заключающиеся в несоответствии значений контролируемых на двигателе параметров нормам технических условий. Для контроля и предотвращения подобных отказов используются параметрические методы диагностирования, базирующиеся на специальной обработке и анализе значений термогазодинамических и иных параметров, измеряемых на работающем двигателе.

По измеренным на диагностируемом двигателе значениям параметров вычисляются с помощью математической модели рабочих процессов двигателя значения других, не измеряемых непосредственно параметров состояния элементов двигателя – коэффициентов потерь, эффективности, площадей характерных проходных сечений по газоздушному тракту. Эти методы диагностирования основываются на современных достижениях в области математического моделирования рабочих процессов ГТД.

Связь параметров состояния с контролируруемыми термогазодинамическими параметрами осуществляется через математическую модель ГТД:

$$F_j = (P_j, x_i, R_\xi) = 0, \quad (1)$$

где $J = \overline{1, k}$, k – число уравнений в системе; P_j – контролируемые параметры (признаки); $j = \overline{1, m}$, m – число контролируемых параметров; x_i – параметры состояния узлов газоз-

душного тракта; $\xi = \overline{1, r}$, n – число параметров состояния; R_ξ – параметры, определяющие режим работы двигателя и внешние условия; $\xi = \overline{1, r}$, r – число параметров, характеризующих режим работы и внешние условия. В линейной форме модель имеет вид :

$$\delta P_j = \sum_{i=1}^n a_{ji} (R_\xi) \delta x_i, \quad (2)$$

где a_{ji} – линейные коэффициенты; δx_i – относительное изменение x_i .

Диагностика состояния ГТД сводится к определению величин δx_i (параметров состояния) минимизацией функции цели вида:

$$\Phi(\delta x_i) = \delta P_j \Rightarrow \min. \quad (3)$$

Данный метод оценки состояния имеет следующие преимущества [1]:

- помимо факта наличия неисправности одновременно определяется место ее локализации;
- применение метода идентификации математических моделей для определения характеристик элементов проточной части, минимизирующего случайные ошибки измерений признаков состояния, позволяет определять значения параметров состояния ближе к их истинным значениям, поскольку в процессе идентификации проводится сбалансированная оценка диагностической информации.

Поскольку параметры ГТД контролируются с погрешностью, обусловленной качеством используемого контрольно-измерительного оборудования, то параметры состояния узлов дви-

гателя (КПД, потери давления в тракте и др.), определяемые идентификацией математической модели (ММ) рабочих процессов двигателя, являются случайными величинами, поэтому возможна только вероятностная оценка параметрического состояния двигателя. Следует отметить, что помимо погрешности контроля, на достоверность оценки состояния влияют также уровень адекватности самой модели, используемый метод идентификации состояния и другие факторы. В данной работе автором предлагается оценку вероятности правильного распознавания состояния двигателя проводить в два этапа. На первом этапе для различных значений критериев дефектов (отклонений от их номинальных значений параметров состояния) узлов ГТД определяются вероятностные характеристики (математическое ожидание, доверительные границы и т. д.). Принципиально определение доверительных границ отклонений параметров состояния двигателя через дисперсии $\sigma^2(\delta x_i)$ ($i = \overline{1, m}$) (при известных значениях дисперсий отклонения контролируемых параметров $\sigma^2(\delta y_i)$) возможно двумя методами:

- аналитическим методом по формуле, известной как «закон сложения ошибок»;
- статистическим моделированием распределения отклонений δx_i в зависимости от δy_i с использованием математической модели рабочих процессов двигателя.

В первом случае дисперсии параметров $\delta x_i = \varphi(\delta y_1, \delta y_2, \dots, \delta y_n)$ оцениваются по формуле:

$$\begin{aligned} \sigma^2(\delta x_i) = & \left(\frac{\partial(\delta x_i)}{\partial(\delta y_1)} \right)^2 \sigma^2(\delta y_1) + \left(\frac{\partial(\delta x_i)}{\partial(\delta y_2)} \right)^2 \sigma^2(\delta y_2) + \dots \\ & + \left(\frac{\partial(\delta x_i)}{\partial(\delta y_n)} \right)^2 \sigma^2(\delta y_n) + 2\rho(\delta y_1 \delta y_2) \left(\frac{\partial(\delta x_i)}{\partial(\delta y_1)} \right) \times \\ & \times \left(\frac{\partial(\delta x_i)}{\partial(\delta y_2)} \right) \sigma(\delta y_1) \sigma(\delta y_2) + \dots, \end{aligned} \quad (4)$$

где $\frac{\partial(\delta x_i)}{\partial(\delta y_j)}$ – частная производная функции (δx_i)

по каждому из аргументов (δy_j) ; $\sigma(\delta y_j)$ – среднеквадратичная ошибка определения δy_j ; $\rho(\delta y_1, \delta y_2)$ – коэффициент корреляции между параметрами δy_1 и δy_2 (при наличии строгой аналитической зависимости – это коэффициент влияния).

При статистически независимых δy_j ($\rho(\delta y_1, \delta y_2) = 0$) формула (4) упрощается:

$$\sigma^2(\delta x_i) = \sum_{j=1}^k \left[\left(\frac{\partial(\delta x_i)}{\partial(\delta y_j)} \right)^2 \sigma^2(\delta y_j) \right]. \quad (5)$$

Коэффициенты влияния $\partial(\delta x_i)/\partial(\delta y_j)$ определяются по алгоритму, используемому в методе диагностических матриц [1]. Расчеты показывают, что аналитическая оценка доверительных границ параметров состояния по формулам вида (4) и (5) может существенно отличаться от фактического значения. Например, при оценке параметрического состояния газоздушного тракта компрессора одновального двигателя, оцениваемого снижением КПД (контролируются расход топлива G_T и температур газа за турбиной T_T^*), это различие составляет 250...300%.

Во втором случае решается оптимизационная задача (рис.1): при известных значениях отклонений математических ожиданий параметров состояния $\delta \bar{x}_1, \dots, \delta \bar{x}_n$ и известных математических ожиданиях отклонений $\delta \bar{y}_1, \dots, \delta \bar{y}_n$ и дисперсий отклонения контролируемых параметров $\sigma^2(\delta y_1), \dots, \sigma^2(\delta y_m)$ определяются оптимальные значения дисперсий отклонений параметров состояния $\sigma^2(\delta x_1), \dots, \sigma^2(\delta x_n)$ по целевой функции:

$$\Phi[\sigma^2(\delta x_1^*), \dots, \sigma^2(\delta x_n^*)] = \min \sum_{j=1}^m \left[\frac{\sigma^2(\delta y_j)_{\text{мод}} - \sigma^2(\delta y_j)}{\sigma^2(y_j)} \right]^2, \quad (6)$$

где $\sigma^2(\delta y_i)_{\text{мод}}, \dots, \sigma^2(\delta y_n)_{\text{мод}}$ – дисперсии отклонений контролируемых параметров, соответствующие дисперсиям отклонений параметров состояния δx_i в процессе оптимизации; $\sigma^2(\delta y_1), \dots, \sigma^2(\delta y_n)$ – дисперсии, характеризующие погрешность контролируемых параметров.

Задача решается численным методом с применением метода нелинейной оптимизации. На втором этапе диагностирования для полученных оптимизацией значений параметров состояния $\{\delta \eta_k^* \pm \Delta_q(\delta \eta_k^*)\}, \dots, \{\delta \eta_r^* \pm \Delta_q(\delta \eta_r^*)\}$ оценивают эффективность используемого для диагностики состояния ГТД метод идентификации:

$$\begin{aligned} \text{Вер}[(\delta x_1 = \delta x_1^*), \dots, (\delta x_n = \delta x_n^*)] = \\ = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left[\int_{-\infty}^{\delta x_{кр,i}} f(\delta x_i^*) dx + \int_{\delta x_{кр,i}}^{+\infty} f(\delta x_i) dx \right], \end{aligned} \quad (7)$$

где $\Delta \delta \eta^*$ – допуск на значение параметра состояния $\delta \eta^*$, соответствующий доверительной вероятности q ; $f(\delta x_i)$ – распределение идентифицируемого значения отклонения i -го параметра состояния; $f(\delta x_i)$ – фактическое распределение отклонения параметра состояния; $\delta x_{кр,i}^*$ – координата точки пересечения кривых распределений $f(\delta x_i^*)$ и $f(\delta x_i)$.

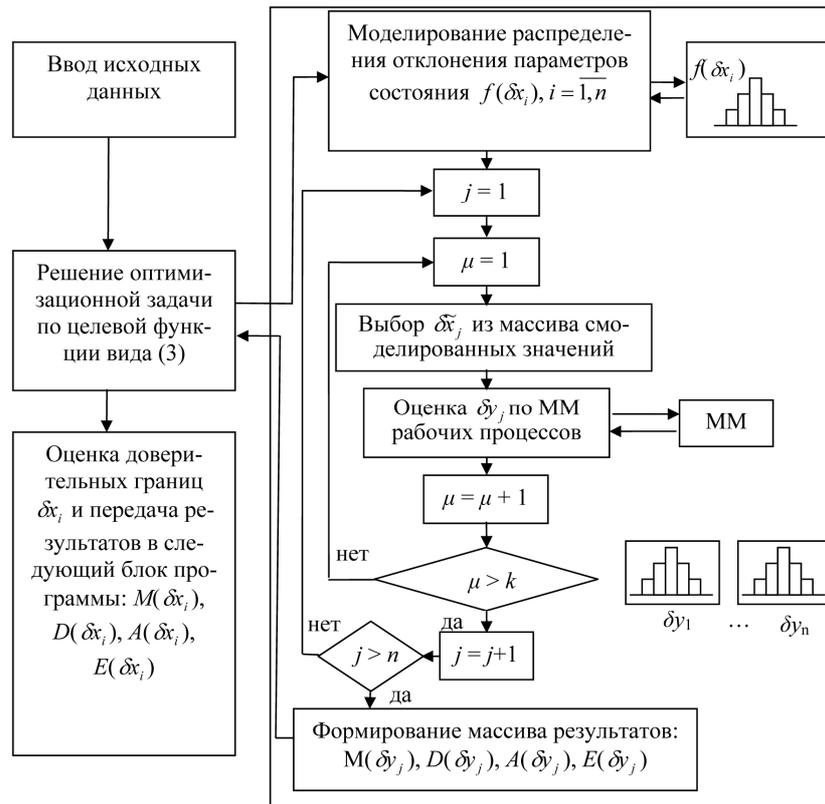


Рис.1. Оценка доверительных границ параметров состояния узлов ГТД при априорно известных законах распределения контролируемых параметров: $M(P_i)$ – математическое ожидание; $D(P_i)$ – дисперсия; $A(P_i)$ – эксцесс; $E(P_i)$ – асимметрия, δy_j – отклонение j -го контролируемого параметра ($j=1, m$), x_i – i -й параметр состояния; k – объем выборки

При использовании данных контроля на нескольких режимах работы двигателя $R_\eta = [r_1, \dots, r_e]_\eta^T$, ($\eta = \overline{1, \xi}$) значения $\sigma^2(\delta y_i)$ в формуле (6) в общем случае будут различаться. Поэтому необходимо проведение многократной оптимизации по целевой функции вида (6) для дискретных значений $\sigma^2(\delta y_j) \in [\sigma^2(\delta y_j)_1, \dots, \sigma^2(\delta y_j)_\xi]$, в результате чего представляется возможным получение зависимостей вида:

$$\begin{aligned} \sigma^2(\delta x_1^*)_1 &= f_1(R); \quad \sigma^2(\delta x_2^*)_2 = f_2(R); \quad \dots; \\ \sigma^2(\delta x_n^*)_\xi &= f_\xi(R). \end{aligned} \quad (8)$$

В частном случае, при $\sigma^2(\delta y_j)_\eta = \text{idem}$ ($j = \overline{1, n}$; $\eta = \overline{1, \xi}$) целевая функция примет вид:

$$\begin{aligned} \Phi[\sigma^2(\delta x_1^*), \dots, \sigma^2(\delta x_n^*)] &= \\ = \min \sum_{\eta=1}^{\xi} \sum_{j=1}^n \left[\frac{\sigma^2(\delta y_j)_{\text{mod}} - \sigma^2(\delta y_j)_\eta}{\sigma^2(\delta y_j)_\eta} \right]^2. \end{aligned} \quad (9)$$

При наличии нескольких методов параметрического диагностирования за окончательный принимается метод, обеспечивающий максимальную вероятность распознавания состояния двигателя [1].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гишваров, А. С. Эффективность методов параметрической оценки технического состояния двигателей на основе термогазодинамических моделей / А. С. Гишваров, И. В. Приб // Сб. тр. СГАУ, 2002. С. 74–79.

ОБ АВТОРЕ



Габдуллин Владислав Салаватович, аспирант каф. авиац. двигателей. Дипл. инж.-мех. по авиац. двигателям (УГАТУ, 2005).