

Библиографический список

1. Т р о щ е н к о В.Г., Ц е й т л и н В.И., Ф л е н е в с к и й Д.С. и др. Автоматизированная система исследований несущей способности рабочих лопаток ГТД в условиях программного силового и теплового нагружения //Научные основы и методы повышения надежности и долговечности газотурбинных двигателей. - Киев: Наукова думка, 1979. - С. 140-149.

2. К о л о т н и к о в М.Е., С т р и л е ц С.Ю., К о с т ы л е в В.Г., К и с е л е в Д.М. Оценка теплонапряженного состояния охлаждаемых лопаток турбин при термоциклических испытаниях //Автоматизированные моделирующие системы в технологических задачах. - Куйбышев: КИТИ, 1984. - С. 50-55.

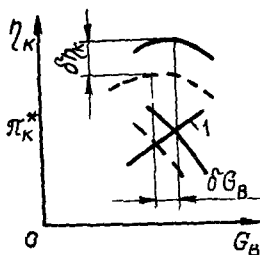
УДК 629.7.036.017.1

И.И.Епишев, В.А.Кочуров

МЕТОД ПУЭЛОВОЙ ДИАГНОСТИКИ ГТД
ПРИ ОГРАНИЧЕННОМ ОБЪЕМЕ ИСХОДНОЙ ИНФОРМАЦИИ

Диагностирование авиационных ГТД с использованием термодинамических параметров в качестве носителей диагностической информации является одним из перспективных направлений работ по повышению надежности и увеличению сроков службы авиадвигателей. Применение методов параметрической диагностики позволяет обнаружить неисправности на ранней стадии их развития, до появления вторичных разрушений.

Неисправность, как правило, первоначально появляется в одном из узлов проточной части. При этом отклонение измеряемых термодинамических параметров, связанное с изменением состояния одного узла, может быть невелико и находиться в пределах допуска. Следовательно, необходимо вести постоянный контроль за уровнем параметров и проводить диагностирование и в тех случаях, когда значения измеряемых параметров находятся в пределах технических норм, но произошло одновременное отклонение нескольких из них от базовых значений.



Р и с. 1. Схема деформации характеристик компрессора: I - линия рабочих режимов; $\delta\pi_K$ - величина деформации характеристики КПД; δG_B - величина деформации напорной характеристики; — — — — — исходное положение характеристик; - - - - - положение характеристик при неисправности

В данной работе рассматриваются два параметра, характеризующих состояние узла: для компрессора - величина деформации характеристики КПД и напорной характеристики (рис. 1), для турбины - величина деформации характеристики КПД и изменение площади ее соплового аппарата. Таким образом, состояние трехвального двухконтурного двигателя характеризуется четырнадцатью переменными.

Основной трудностью диагностики ГТД при локализации места неисправности проточной части является ограниченный объем исходной информации (малое число штатных измеряемых параметров). Исследования авторов показывают, что для локализации места неисправности в предположении о наличии ее в одном из узлов проточной части необходимо измерение минимум трех параметров рабочего процесса. Причем в случае, когда неисправность появляется одновременно в двух узлах, решение задачи диагностики в вероятностном аспекте позволяет выявить узел, изменение состояния которого наиболее сильно повлияло на отклонение измеряемых параметров. Отклонение этих параметров, вызванное изменением состояния другого узла, принимается за погрешности измерения.

В качестве диагностической модели, связывающей отклонения параметров состояния и измеряемых параметров, использована линейная модель в виде системы алгебраических уравнений в отклонениях

$$\delta Y = A \delta X, \quad (I)$$

где δY - вектор отклонений измеряемых параметров;

δX - вектор отклонений параметров состояния;

A - матрица коэффициентов взаимного влияния параметров.

Предполагая наличие дефекта в одном узле, при измерении трех параметров рабочего процесса из системы уравнений (I) для каждого узла можно получить систему из трех уравнений:

$$\begin{cases} \delta Y_1 = a_{Y_1 \eta_i} \delta \eta_i + a_{Y_1 A_i} \delta A_i ; \\ \delta Y_2 = a_{Y_2 \eta_i} \delta \eta_i + a_{Y_2 A_i} \delta A_i ; \\ \delta Y_3 = a_{Y_3 \eta_i} \delta \eta_i + a_{Y_3 A_i} \delta A_i , \end{cases} \quad (2)$$

где $\delta \eta_i$ - величина деформации характеристики КПД;

δA_i - величина деформации напорной характеристики компрессора или изменение площади соплового аппарата турбины;

$a_{Y_j \eta_i}, a_{Y_j A_i}$ - коэффициенты влияния параметров состояния i -го узла на j -й измеряемый параметр.

Различные изменения параметров состояния определяют в трехмерном пространстве с базисом $\delta Y_1, \delta Y_2, \delta Y_3$ некоторую плоскость [3]. Ограничения, накладываемые на изменения параметров состояния, выделяют на этой плоскости некоторый участок S_i . Эти ограничения характеризуются реально возможными изменениями параметров состояния

$$\delta \eta_{min} < \delta \eta_i < \delta \eta_{max} ,$$

$$\delta A_{min} < \delta A_i < \delta A_{max} .$$

В действительности отклонения измеряемых параметров $\delta Y_1^*, \delta Y_2^*, \delta Y_3^*$ не будут точно удовлетворять уравнениям (2) из-за погрешностей измерения. Вероятность того, что комплекс признаков $K^* = \{\delta Y_1^*, \delta Y_2^*, \delta Y_3^*\}$ вызван неисправностью данного узла, равна вероятности того, что получены отклонения параметров $\delta Y_1^*, \delta Y_2^*, \delta Y_3^*$, тогда как действительные значения этих отклонений принадлежат участку плоскости S_i .

Плотность распределения величин $\delta Y_1^*, \delta Y_2^*, \delta Y_3^*$ в точке с координатами $\delta Y_1, \delta Y_2, \delta Y_3$, принадлежащей плоскости S_i , при нормальном законе распределения определяется выражением

$$f(\delta Y_1, \delta Y_2, \delta Y_3) = \frac{1}{(2\pi)^{3/2} \sigma_{Y_1} \sigma_{Y_2} \sigma_{Y_3}} e^{-\frac{1}{2} \left[\frac{(\delta Y_1 - \delta Y_1^*)^2}{\sigma_{Y_1}^2} + \frac{(\delta Y_2 - \delta Y_2^*)^2}{\sigma_{Y_2}^2} + \frac{(\delta Y_3 - \delta Y_3^*)^2}{\sigma_{Y_3}^2} \right]} \quad (3)$$

где $\sigma_{Y_1}, \sigma_{Y_2}, \sigma_{Y_3}$ - средние квадратические погрешности измерения.

Произведем замену:

$$\delta z_j = \delta Y_j / \sigma_{Y_j}, \quad \delta z_j^* = \delta Y_j^* / \sigma_{Y_j^*}.$$

Показатель степени в формуле (3) можно представить так:

$$\sum_{j=1}^3 (\delta z_j - \delta z_j^*)^2 = \sum_{j=1}^3 (\delta z_j^* - \delta z_j^0)^2 + \sum_{j=1}^3 (\delta z_j - \delta z_j^0)^2, \quad (4)$$

где $\delta z_1^0, \delta z_2^0, \delta z_3^0$ - координаты точки пересечения плоскости и перпендикуляра к ней, опущенного из точки с координатами $\delta z_1^*, \delta z_2^*, \delta z_3^*$.

Уравнение плоскости имеет вид

$$\delta z_3 - C \delta z_1 - D \delta z_2 = 0.$$

Коэффициенты C и D являются решением системы уравнений, полученной из (2) с учетом того, что одно из трех уравнений является линейной комбинацией двух других:

$$\begin{cases} C \delta v_{Y_1 z_i} + D \delta v_{Y_2 z_i} = \delta v_{Y_3 z_i}; \\ C \delta v_{Y_1 A_i} + D \delta v_{Y_2 A_i} = \delta v_{Y_3 A_i}, \end{cases}$$

где

$$\delta v_{Y_j z_i} = a_{Y_j z_i} / \sigma_{Y_j}; \quad \delta v_{Y_j A_i} = a_{Y_j A_i} / \sigma_{Y_j}.$$

Так как величина $\sum_{j=1}^3 (\delta z_j^* - \delta z_j^0)^2$ постоянна для данного узла при конкретной реализации комплекса K^* , то вероятность $P(K^*/S_i)$ того, что комплекс K^* принадлежит участку плоскости S_i , определяется интегрированием выражения (3) по плоскости S_i . С учетом уравнений (2), (3) и (4) выражение для условной вероятности имеет вид

$$P(K^*/S_i) = \frac{e^{-\frac{1}{2} \sum_{j=1}^3 (\delta z_j^* - \delta z_j^0)^2}}{(2\pi)^{3/2}} \iint_{S_i} e^{-\frac{1}{2} \sum_{j=1}^3 (\delta z_j - \delta z_j^0)^2} ds.$$

Теперь удобно перейти к переменным интегрирования δz_i и δA_i :

$$P(K^*/S_i) = \frac{Q e^{-\frac{1}{2} \sum_{j=1}^3 (\delta z_j^* - \delta z_j^0)^2}}{(2\pi)^{3/2}} \iint_{\delta z_{\min} \delta A_{\min}}^{\delta z_{\max} \delta A_{\max}} e^{-\frac{1}{2} [a_1 \delta z_i^2 + a_2 \delta A_i^2 + a_3 \delta z_i \delta A_i]} d\delta z_i d\delta A_i, \quad (5)$$

где Q - коэффициент пропорциональности между элементарными площадями ds и $d\delta z_i d\delta A_i$, равный векторному произведению векторов $(\delta v_{Y_1 z_i}, \delta v_{Y_2 z_i}, \delta v_{Y_3 z_i})$ и $(\delta v_{Y_1 A_i}, \delta v_{Y_2 A_i}, \delta v_{Y_3 A_i})$.

$$\alpha_1 = \sum_{j=1}^3 \delta y_{j1}^2, \alpha_2 = \sum_{j=1}^3 \delta y_{j2}^2, \alpha_3 = \sum_{j=1}^3 \delta y_{j1} \delta y_{j2}, \Delta \gamma_i = \delta \gamma_i - \delta \gamma_i^0, \Delta A_i = \delta A_i - \delta A_i^0.$$

Вероятность $P(K^*/S_i)$ определяется по выражению (5) после приведения квадратичной формы в показателе подынтегрального выражения к каноническому виду и интегрирования по области, имеющей вид параллелограмма, путем разбиения ее на прямоугольники со сторонами, параллельными главным осям рассеивания $|I|$.

Наиболее вероятные значения отклонений параметров состояния $\delta \gamma_i^0$ и δA_i^0 вычисляются по δx_j^0 .

Величина площади S_i i -го узла характеризует чувствительность данного набора измеряемых параметров к изменению состояния этого узла. Чем больше площадь S_i , тем шире диапазон возможных значений измеряемых параметров при неисправности i -го узла, а следовательно, тем выше вероятность $P(K^*/S_i)$. Например, в случае, когда точка с координатами, равными отклонениям измеряемых параметров, принадлежит линии пересечения двух плоскостей, более вероятной является неисправность узла, которому соответствует большая площадь S_i .

Вероятность неисправности i -го узла при реализации комплекса признаков K^* определяется формулой Байеса [2]

$$P(D_i|K^*) = P(D_i)P(K^*/S_i) / \sum_{i=1}^N P(D_i)P(K^*/S_i),$$

где D_i - диагноз неисправности i -го узла;

$P(D_i)$ - априорная вероятность i -го диагноза;

N - количество узлов проточной части.

В начальный момент эксплуатации, когда неизвестны априорные вероятности диагнозов, принимается, что они равны.

Таким же образом рассчитываются вероятности неисправности всех узлов. Величины этих вероятностей определяют последовательность осмотра узлов проточной части при подтверждении диагноза.

Разработанный метод позволяет использовать измеряемые параметры с различной чувствительностью. Например, в случае, когда коэффициенты третьего уравнения в системе уравнений (2) равны нулю, плоскость S_i лежит в плоскости $\delta Y_1, \delta \delta Y_2$.

Пример. На трехвальном двухконтурном двигателе были зарегистрированы отклонения измеряемых частот вращения роторов сред-

него и высокого давления - 0,29% и - 1,18% соответственно и температуры газа за турбиной низкого давления +1,71%. Рассмотрены следующие узлы проточной части: вентилятор второго контура (Вн); компрессоры низкого (КНД), среднего (КСД) и высокого давления (КВД); турбины высокого (ТВД), среднего (ТСД) и низкого давления (ТНД). Рассчитанные по изложенной методике вероятности неисправности узлов имеют значения: Вн - 0,002; КНД - 0,004; КСД - 0,057; КВД - 0,391; ТВД - 0,510; ТСД - 0,025; ТНД - 0,011.

Наиболее вероятной является неисправность ТВД. Высокая вероятность неисправности КВД объясняется сходством признаков неисправностей ТВД и КВД. Если при осмотре ТВД неисправность не выявлена, необходимо осмотреть КВД.

При разборке двигателя обнаружен обрыв лопаток турбины высокого давления, что подтверждает расчетный диагноз.

Библиографический список

1. В е н т ц е л ь Е.С. Теория вероятностей. - М.: Наука, 1969. - 576 с.
2. Б и р г е р И.А. Техническая диагностика. - М.: Машиностроение, 1978. - 240 с.
3. Б у г р о в Я.С., Н и к о л ь с к и й С.М. Элементы линейной алгебры и аналитической геометрии. - М.: Наука, 1984. - 192 с.

УДК 539.3:534.1

О.К.К о ш к и н

О КОЛЕБАНИЯХ ПЛАСТИНЫ ПОД ДЕЙСТВИЕМ "СЛЕДЯЩЕЙ" НАГРУЗКИ

Известно, что "следящие" нагрузки (давление газа, гидростатическое давление и др.) существенно влияют на колебания упругих тел /1-4/. Поэтому их необходимо учитывать при проектировании механических систем, и в частности при расчете собственных частот конструкций, находящихся под воздействием такого рода нагрузок.

Влияние "следящей" нагрузки на собственные частоты колебаний балки рассмотрено в работе /3/, где приводится таблица изменения первых трех частот в зависимости от нагрузки.