

УДК 621.438.004.58

А.А. ГОРЯЧИЙ

Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Украина

### РАСПОЗНАВАНИЕ НЕИСПРАВНОСТИ КАНАЛА ИЗМЕРЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ НА ВХОДЕ В ГТД С РЕГУЛИРУЕМЫМ НАПРАВЛЯЮЩИМ АППАРАТОМ

В статье рассматривается задача распознавание дефекта датчика температуры воздуха на входе в ГТД. Погрешность датчика искажает не только вычисляемые диагностические параметры, но и влияет на систему управления механизацией компрессора. Предложены пути решения. Используются результаты экспериментальной регистрации и нелинейная термогазодинамическая модель ГТД.

**газотурбинный двигатель, диагностирование, математическая модель, техническое состояние**

В статье рассматриваются особенности обработки результатов регистрации параметров газотурбинного двигателя (ГТД) системой параметрического диагностирования (СПД), организованной по принципам, описанным в статье [1]. Результаты работы такой системы рассматривались нами и ранее [2, 3].

Объект диагностирования – ГТУ наземного применения с одновальным газогенератором (ГГ) и свободной турбиной (СТ). Компрессор ГГ оснащен регулируемым направляющим аппаратом (РНА).

В рассматриваемой конструкции, как и в большинстве ГТД, использована зависимость угла положения РНА  $\alpha_{РНА}$  от приведенной частоты вращения компрессора (рис. 1)  $n_{ГГпр.}: \alpha_{РНА} = f(n_{ГГпр.})$ , где

$$n_{ГГпр.} = n_{ГГ} \cdot \sqrt{\frac{288,15}{T_H^*}}$$

Основа применяемых методов контроля состояния проточной части ГТД – допусковый контроль. В качестве диагностических параметров в СПД применена разность  $\Delta Y_i$  между реальным значением контролируемого параметра  $Y_i$  и его «нормальным» значением  $Y_{норм.i}$  – т.е. таким, какое предполагается получить от исправного двигателя при данных атмосферных условиях и заданных режимных параметрах. Нормальные значения контролируемых параметров вычисляются как  $\vec{Y}_{норм.} = A \cdot \vec{U}$ , где  $\vec{U}$  –

вектор режимных параметров и атмосферных условий, содержащий, не только значения самих величин, но и их квадраты и попарные произведения, а  $A$  – матрица, содержащая коэффициенты полиномиальных моделей.

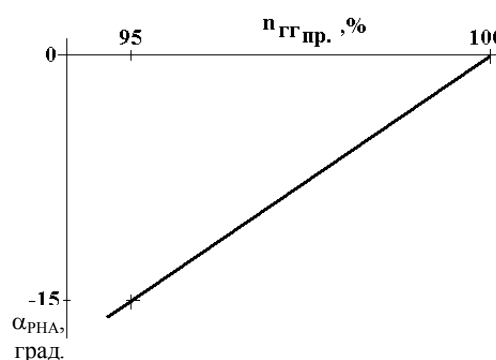


Рис. 1. Зависимость положения РНА от приведенной частоты вращения компрессора

При контроле измеряют параметры объекта  $\vec{Y}$ , ним вычисляют контролируемые показатели  $\Delta \vec{Y} = \vec{Y} - \vec{Y}_{норм.}$ , и проверяют для каждого  $i$ -го показателя условие  $D_{н.i} < \Delta Y_i < D_{в.i}$ . Если хотя бы одно из этих условий не выполняется, объект неисправен.

В общем случае, при малых проявлениях дефектов, отклонение параметра от нормы можно рассматривать как зависимость  $\Delta \vec{Y} = M \cdot \vec{\Theta}$ , где  $\vec{\Theta}$  – вектор отклонений от нормы параметров характеристик отдельных узлов, или, иными словами, описа-

ние дефекта конкретного узла – компрессора, турбины, камеры сгорания, выходного устройства в безразмерной форме.  $M$  – матрица коэффициентов влияния дефектов на контролируемые параметры, или, иными словами, линейная модель неисправных состояний.

Распознавание состоит в том, чтобы по известным  $A$  и  $\Delta \bar{Y}$  найти вектор  $\bar{\Theta}$  и выявить неисправный узел.

Таким образом, для работы СПД должны быть заранее известны: состав вектора  $\bar{\Theta}$ , матрица  $A$  (чаще для ее расчета используются эксплуатационные данные) и матрица  $M$  (как правило, вычисляется по нелинейной поузловой математической модели (НЛММ) вида  $\bar{Y}_{норм.} = f(\bar{U}, \bar{\Theta})$ , что связано со сложностью постановки эксперимента по моделированию дефектов на эксплуатирующемся двигателе), а также допуски  $\bar{D}_g$  и  $\bar{D}_n$ .

Для отдельно взятого параметра проточной части ГТД модель нормального состояния выглядит следующим образом:

$$Y_i = \alpha_{i,1} + \alpha_{i,2}n_{ГТ} + \alpha_{i,3}n_{СТ} + \alpha_{i,4}T_{ex}^* + \alpha_{i,5}P_{ex}^* + \alpha_{i,6}n_{ГТ}^2 + \alpha_{i,7}n_{СТ}^2 + \alpha_{i,8}T_n^{*2} + \alpha_{i,9}P_n^{*2} + \alpha_{i,10}n_{ГТ}n_{СТ} + \alpha_{i,11}n_{ГТ}T_{ex}^* + \alpha_{i,12}n_{ГТ}P_{ex}^* + \alpha_{i,13}n_{СТ}T_{ex}^* + \alpha_{i,14}n_{СТ}P_{ex}^* + \alpha_{i,15}T_{ex}^*P_{ex}^*,$$

где  $n_{ГТ}$  – частота вращения ротора газогенератора;  $n_{СТ}$  – частота вращения свободной турбины;  $T_{ex}^*$  – температура воздуха на входе в ГТД;  $P_{ex}^*$  – давление воздуха на входе в ГТД;  $\alpha_{i,1} - \alpha_{i,15}$  – коэффициенты полиномиальной модели, образующие  $i$ -ю строку матрицы  $A$ .  $n_{ГТ}$ ,  $n_{СТ}$ ,  $T_{ex}^*$ , и  $P_{ex}^*$  будем называть аргументами модели нормального состояния. Следует иметь в виду, что некоторые из коэффициентов  $\alpha$  задаются равными нулю. Вследствие отказа от использования в модели информации о характеристиках узлов и протекающих в них термогазоди-

намических процессах коэффициенты  $\bar{\alpha}$  не имеют физического смысла: они являются коэффициентами регрессии.

Набор  $\bar{Y}$  измеряемых контролируемых параметров представлен такими параметрами, как:  $T_{mгг}^*$  – температура продуктов сгорания за турбиной газогенератора – этот параметр наиболее чувствителен ко всем дефектам двигателя;  $P_k^*$  – давление воздуха на выходе из компрессора газогенератора;  $Ne$  – мощность ГТД (на практике заменяется мощностью, потребляемой нагрузкой с поправкой на механический КПД);  $G_m$  – массовый расход топлива в ГТД.

По прошествии полугода работы СПД при анализе результатов было обнаружено, что начиная с определенного времени отклонения контролируемых параметров, до того равномерно рассеянные вокруг 0, смещаются на величину до 5% (рис. 2). Таким образом, систематическое смещение отдельных параметров составило:  $\Delta T_{mгг}^* = +0,5\%$ ,  $\Delta P_k^* = +1,5\%$ ,  $\Delta Ne = +3\%$ ,  $\Delta G_m = +2\%$ .

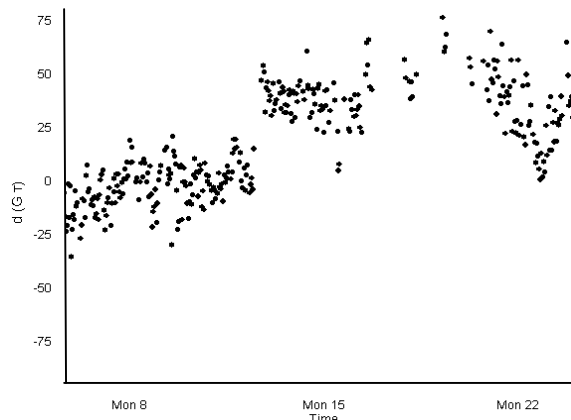


Рис. 2. Диагностический параметр  $\Delta G_m$ , начиная с 12 марта, скачком изменяется на +40 кг/час

Таким образом, диагностические параметры проточной части внезапно значительно изменились, а алгоритм распознавания не отнес это состояние ни с одной из знакомых неисправностей. Впоследствии выяснилось, что при обслуживании двигателя во входном устройстве был установлен нештатный датчик температуры, отчего показания температуры  $t_{ex}$  оказались смещенными на величину систематической погрешностью в  $+5...+7$  °C (рис. 3).

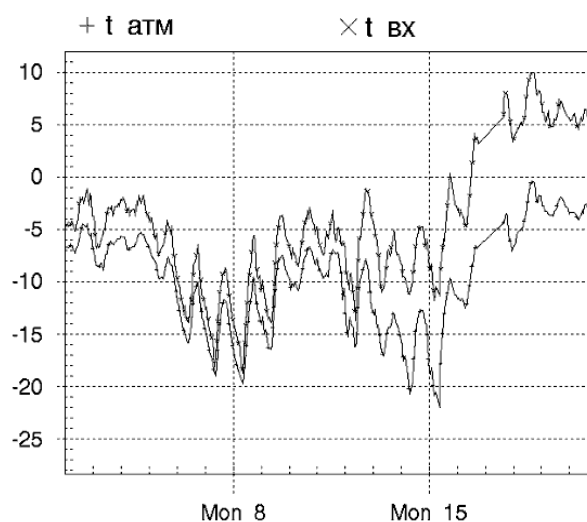


Рис. 3. Неисправность датчика измерения температуры на входе в ГТУ  $t_{ex}$

Но влияние погрешности  $+5\text{ }^{\circ}\text{C}$  датчика температуры воздуха на входе в ГТД на параметры проточной части должно было составить в соответствии с моделью нормального состояния:

$$\Delta T_{mz}^* = +3,5\%, \Delta P_{\kappa}^* = +2,5\%, \Delta Ne = +8\%, \Delta G_m = +5\%.$$

Анализ показал, что в НЛММ двигателя использовалась характеристика компрессора, включающая в себя модель исправно функционирующей системы управления РНА, а поэтому влияние отклонения РНА от нормы на контролируемые параметры не моделировалось, и, как следствие, не закладывалось в СПД. Но отклонение  $+5\text{ }^{\circ}\text{C}$  температуры  $t_{ex}^*$  приводят к  $-1\%$  погрешности при вычислении приведенной частоты вращения компрессора, а это, в свою очередь, приводит к смещению ВНА на  $-3\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

Исследования влияния отклонения ВНА в  $-3\text{ }^{\circ}\text{C}$  на контролируемые параметры показало, что на исправном двигателе смещение составит:

$$\Delta T_{mz}^* = -3\%; \Delta P_{\kappa}^* = -1\%;$$

$$\Delta Ne = -4\%; \Delta G_m = -2,5\%,$$

и, таким образом, наблюдаемое явление было объяснено.

В качестве итогов были предложены следующие пути решения проблемы:

1) дооснастить диагностическую систему алгоритмом распознавания систематической погрешности датчика сравнением его с атмосферной температурой;

2) настроить алгоритм распознавания данного дефекта по имеющейся теперь эксплуатационной информации;

3) использовать в НЛММ характеристику компрессора, расслоенную по  $\alpha_{РНА}$ , и моделировать отклонение положение РНА от нормы;

4) внести  $\alpha_{РНА}$  в качестве аргумента в полиномиальную модель нормального состояния.

На практике достаточными оказались первые два мероприятия.

## Литература

1. Универсальная подсистема параметрической диагностики газоперекачивающих агрегатов с газотурбинным приводом и средства ее адаптации к конкретным условиям применения / А.А.Горячий, С.В.Епифанов, В.В.Нерубаский и др. // *Авиационно-космическая техника и технология*. – Х.: ГАУ «ХАИ», 2000. – Вып. 19. Тепловые двигатели и энергоустановки. – С. 364-352.

2. Лобода И.И., Горячий А.А. Диагностический анализ отклонений контролируемых параметров ГТУ от нормы // *Вестник двигателестроения*. – 2005. – № 2. – С. 161-168.

3. Горячий А.А. Диагностический критерий выявления скачкообразных изменений конфигурации проточной части ГТД // *Авиационно-космическая техника и технология*. – Х.: ГАУ «ХАИ», 1999. – Вып. 9. Тепловые двигатели и энергоустановки. – С. 202-206.

Поступила в редакцию 12.05.2006

**Рецензент:** д-р техн. наук, профессор Б.И. Кузнецов, Национальный технический университет «ХПИ», Харьков.