УДК 629.7

Зотин Н.А.

МЕТОДЫ ПРЕДСТАВЛЕНИЯ ИНФОРМАЦИИ В ЗАДАЧАХ ДИАГНОСТИКИ ГАЗОТУРБИННОГО ДВИГАТЕЛЯ

В настоящее время газотурбинный двигатель (ГТД) является основным типом двигателей, который применяется на авиационных летательных аппаратах [1]. Каждый экземпляр ГТД эксплуатируется длительный период времени и работает в тяжёлых и разнообразных условиях. Возможность поддержания характеристик ГТД на высоком уровне в течение всего его строка службы напрямую зависит от возможности своевременно и объективно определить техническое состояние (ТС) двигателя.

Для оценки ТС ГТД используются диагностические модели [3, 4], позволяющие по измеренным значениям параметров двигателя определить его ТС. Ввиду того, что ГТД является сложным техническим объектом, состоящим из большого числа элементов, в качестве диагностических моделей часто используют модели идентификации.

В общем виде модель идентификации представляет собой множество функций

$$\begin{gathered} \left\{\text{Пар}_{\text{вых},r} = f\left(\left\{\text{Пар}_{\text{вх},m}\right\}_{m=1}^{n_m}, \left\{C_j\right\}_{j=1}^{n_{C_r}}\right)\right\}_{r=1}^{n_r}, \\ \left\{\text{Пар}_{\text{вых},r}\right\}_{r=1}^{n_r} \cup \left\{\text{Пар}_{\text{вх},m}\right\}_{m=1}^{n_m} = \left\{\text{Пар}_i\right\}_{i=1}^{n_{\text{Пар}}}, \end{gathered} \tag{1}$$

где $\text{Пар}_{\text{вых},r}$ – r-ый выходной параметр модели ГТД; $\text{Пар}_{\text{вх},m}$ – m-ый входной параметр модели ГТД; n_r – число выходных параметров; n_m – число входных параметров; C_j – j-ый коэффициент модели; n_{C_r} – число коэффициентов модели; Пар_i – параметр модели; $n_{\text{Пар}}$ – число параметров модели.

При выборе параметров модели следует учесть, что ГТД является многорежимным объектом, а также то, что экземпляры одного и того же типа двигателя отличаются друг от друга по своим характеристикам [2]. Следовательно, в качестве параметров модели ГТД следует использовать масштабированные значения параметров ГТД, соответствующие одному и тому же его режиму работы (одинаковому значению режимного параметра).

Множество коэффициентов $\left\{C_j\right\}_{j=1}^{n_{C_r}}$ модели ГТД определяется его техническим состоянием. Поэтому наиболее важным вопросом является выбор формы модели (вида функциональных зависимостей между параметрами), используя которую можно определить множество $\left\{C_j\right\}_{j=1}^{n_{C_r}}$, описывающее ТС ГТД.

Проверка адекватности модели идентификации и выбор её оптимальной формы являются трудоёмкой задачей, кроме того модели, отличные по форме, дают разное представление о ТС ГТД. В связи с этим в настоящей работе предлагается метод определения ТС ГТД с использованием сразу множества моделей идентификации, отдельная оценка приемлемости каждой из которых не требуется.

Из (1) следует, что значения функции

$$F = f\left(\{\text{Пар}_i\}_{i=1}^{n_{\text{Пар}}}, \{C_j\}_{j=1}^{n_C}\right) \tag{2}$$

потенциально могут зависеть от ТС ГТД. Функцию F будем называть функцией состояния.

Вычислим значения множества различных (по своим коэффициентам) функций состояния от измеренного значений параметра. Это множество примет вид

$$\left\{F^*_{\text{Пар}_i,l} = f\left(\text{Пар}^*_i, \left[\{C_{ij}\}_{j=1}^{n_{Cil}}\right]_l\right)\right\}_{l=1}^{n_{F_i}},$$

где $F^*_{\text{Пар}_i,l}$ – значение l-ой функции; Пар^*_i – значение i-го параметра ГТД; $\left[\{C_{ij}\}_{j=1}^{n_{Cil}}\right]_l$ – множество коэффициентов l-ой функции для i-го параметра; $n_{C_{il}}$ – количество коэффициентов l-ой функции для i-го параметра; n_{F_i} – количество вычисленных значений различных функций от Пар^*_i.

Составим из полученных значений функций матрицы для измеренных значений различных i-ых параметров и представим их в формах, подобных следующим примерам:

$$\begin{bmatrix} F^*_{\text{Пар}_i,1} & F^*_{\text{Пар}_i,2} & \cdots & F^*_{\text{Пар}_i,n_{F_i}} \\ F^*_{\text{Пар}_i,1} & F^*_{\text{Пар}_i,2} & \cdots & F^*_{\text{Пар}_i,n_{F_i}} \\ & & \cdots & \\ F^*_{\text{Пар}_i,1} & F^*_{\text{Пар}_i,2} & \cdots & F^*_{\text{Пар}_i,n_{F_i}} \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} F^*_{\text{Пар}_i,1} & F^*_{\text{Пар}_i,1} & & F^*_{\text{Пар}_i,1} \\ F^*_{\text{Пар}_i,2} & F^*_{\text{Пар}_i,2} & \cdots & F^*_{\text{Пар}_i,2} \\ \cdots & \cdots & & \cdots \\ F^*_{\text{Пар}_i,n_{F_i}} & F^*_{\text{Пар}_i,n_{F_i}} & & F^*_{\text{Пар}_i,n_{F_i}} \end{bmatrix},$$

$$\begin{bmatrix} F^*_{\text{Пар}_i,n_{F_i}} & 0 & & 0 \\ \cdots & F^*_{\text{Пар}_i,n_{F_i}} & & 0 \\ F^*_{\text{Пар}_i,2} & \cdots & & 0 \\ F^*_{\text{Пар}_i,1} & F^*_{\text{Пар}_i,2} & \cdots & F^*_{\text{Пар}_i,n_{F_i}} \\ 0 & F^*_{\text{Пар}_i,1} & & \cdots \\ 0 & 0 & & F^*_{\text{Пар}_i,2} \\ 0 & 0 & & F^*_{\text{Пар}_i,1} \end{bmatrix}.$$

Каждое значение функции в матрице вычисляется на основании одного и того же значения параметра объекта, но при её различных коэффициентах $\{C_{ij}\}_{j=1}^{n_{Cil}}$. Значения коэффициентов и, следовательно, значения функции определяет позиция в матрице, которая задаётся индексами строки и столбца, соответственно x и y.

Закон изменения значений коэффициентов функции одного и того же параметра Пар_i от значений индексов будем называть структурой матрицы i-го параметра.

Измеренное значение параметра объекта Пар_i^*, используемое для определения значений функций, будем называть наполнителем матрицы.

Объединим полученное множество матриц в одну кумулятивную матрицу, каждый элемент которой определяется как

$$F_{x,y}^* = f\left(\left\{F_{\text{Пар}_i,l_{i,x,y}}^*\right\}_i^{n_\text{Пар}}\right) = f\left(\{\text{Пар}_i^*\}_{i=1}^{n_\text{Пар}}, \left[\{C_j\}_{j=1}^{n_{C_{x,y}}}\right]_{x,y}\right),$$

где $F_{x,y}^*$ – значение элемента матрицы в строке x и столбце y; $F_{\text{Пар}_i,l_{i,x,y}}^*$ – значение $l_{i,x,y}$-ой функции от измеренного параметра Пар_i; $n_\text{Пар}$ – число параметров ГТД; $l_{i,x,y}$ – идентификатор вида функции, определяемого её коэффициентами, зависящий от выбранной структуры матриц; x, y – индексы позиции значения функции в матрице; $\left[\{C_j\}_{j=1}^{n_{F_{x,y}}}\right]_{x,y}$ – множество коэффициентов функции $F_{x,y}$.

Подобно матрице, составленной для каждого i-го параметра, кумулятивная матрица также обладает своей структурой и наполнителем $\{\text{Пар}_i^*\}_{i=1}^{n_\text{Пар}}$.

Каждая из функций полученного множества $\left\{\{F_{x,y}\}_{x=1}^{n_x}\right\}_{y=1}^{n_y}$ подобна функции (2) и, следовательно, может характеризовать ТС ГТД.

Очевидно, что не все функции позволят решить задачу диагностики, поэтому существует необходимость в интегральной оценке их значений. Если значения представить в числовом формате, то для оператора кумулятивная матрица будет разрозненным набором чисел. В связи с этим предлагается использовать графический метод представления данных, в котором позиция значения функции в матрице будет определять координату на плоскости, а само значение цвет, соответствующий этой координате. Так как в вычислительной технике цвет изображения задаётся числом или массивом чисел, то переход от значения функции к цвету осуществим.

Представление кумулятивной матрицы с одинаковой структурой, но различными наполнителями показано на рисунке 1. В данном случае каждый наполнитель состоит из четырёх значений параметров, которые находятся в пределах $[0; 1]$, что соответствует решению задачи диагностики с использованием масштабированных значений параметров, как при оценке ТС ГТД.

Данный пример показывает, как могут отличаться изображения кумулятивной матрицы объекта диагностики при различном наборе значений рабочих параметров.

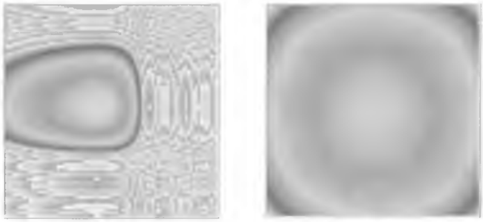

Рисунок 1 – Графическое представление кумулятивных матриц

Классификацию графических представлений кумулятивных матриц в соответствии с ТС ГТД предполагается проводить с использованием цифровых методов анализа изображений.

Основные преимущества использования метода заключаются в отсутствии необходимости по отдельности определять приемлемость каждой функции состояния для её использования при определении ТС объекта, а также в возможность произвести интегральную оценку ТС по множеству значений функций состояния при анализе изображения.

Недостатком подхода является необходимость создания структуры кумулятивной матрицы, позволяющей получить как можно больше значений различных функций состояния, цветовое представление которых будет составлять различимые, цельные изображения.

Библиографический список

1. Теория, расчёт и проектирование авиационных двигателей и энергетических установок: учеб. пособие. В 3 т. Т 3. Основные проблемы: Начальный уровень проектирования, газодинамическая доводка, специальные характеристики и конверсия авиационных ГТД / В.В. Кулагин [и др.]; под. общ. ред. В.В. Кулагина. – М.: Машиностроение, 2005. – 464 с.

2. Технология эксплуатации, диагностики и ремонта газотурбинных двигателей: учеб. пособие / Ю.С. Елисеев, В.В. Крымов, К.А. Малиновский, В.Г. Попов. – М.: Высш. шк., 2002. – 355 с.

3. Чуян, Р.К. Методы математического моделирования двигателей летательных аппаратов: учеб. пособие / Р.К. Чуян. – М.: Машиностроение, 1988. – 288 с.

4. Эйкхофф, П. Основы идентификации систем управления / Пер. с англ. В.А. Лотоцкого, А.С. Манделя; под ред. Н.С. Райбмана – М.: Мир, 1975. – 683 с.