

УДК 681.518.5

В. В. НЕРУБАССКИЙ

АО «Элемент», Одесса, Украина

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ СИСТЕМЫ МАХАЛАНОВИСА-ТАГУТИ В ЗАДАЧАХ РАСПОЗНАВАНИЯ НЕИСПРАВНОСТЕЙ ГТД

Приведено описание основных особенностей системы Махалановиса-Тагути как вероятностно-аналитического метода определения технического состояния ГТД. Теоретические сведения подкреплены примерами практического использования системы Махалановиса-Тагути для диагностирования неисправностей проточной части ГТД. Описываются этапы использования системы Махалановиса-Тагути и процедура определения значимых переменных с использованием ортогональных массивов и соотношений «сигнал/шум». Даются рекомендации по устранению недостатков системы Махалановиса-Тагути и направления дальнейших работ.

Ключевые слова: система технической диагностики, параметрическая диагностика, распознавание образов неисправностей, система Махалановиса-Тагути, расстояние Махалановиса.

Введение

Широкое внедрение систем технической диагностики (СТД) в практику эксплуатации ГТД авиационного и наземного применения предполагает совершенствование всего комплекса инструментальных и методических средств диагностирования. Наиболее привлекательными с точки зрения эксплуатации являются методы параметрической диагностики, базирующиеся на специальной обработке и анализе значений термогазодинамических и иных параметров, измеряемых на работающем двигателе. Наряду с традиционными методами параметрической диагностики – допусковым контролем, трендовым анализом и прогнозированием – используются различные методы распознавания неисправностей [1]. Последние решают сложную задачу отнесения текущего состояния объекта к одному из возможных состояний – исправному и множеству различных неисправных.

Одним из перспективных направлений в области анализа многомерных систем, к которым принадлежит ГТД как объект исследования, является теория распознавания образов в многомерном пространстве параметров наблюдения. Характерным примером такого направления является использование системы Махалановиса-Тагути (СМТ). СМТ уже широко используется рядом иностранных фирм, например Mitsubishi Heavy Industries, для анализа технического состояния ГТД [2].

Целями данной статьи является оценка применимости СМТ для решения задач распознавания неисправностей ГТД, а также опробование алгоритмов и прикладного программного обеспечения (ПО), реализующих СМТ. Такое ПО может быть использовано в составе перспективных СТД ГТД как наземного, так и бортового исполнения.

1. Основы теории СМТ

В целом СМТ является технологией распознавания, помогающей дать количественную оценку созданной с использованием аналитических методов обработки данных многомерной шкалы измерений. Чтобы построить такую многомерную шкалу измерений необходимо иметь меру или метрику. Такая метрика получила название расстояние Махалановиса (Mahalanobis distance - MD) [3]. MD используется для определения степени сходства между исходным набором данных, называемым пространством Махалановиса и характеризующим исправное состояние объекта, и любым другим набором данных [3]. Базой для расчета MD является корреляционная матрица, отражающая зависимости между всеми параметрами наблюдения (рис. 1).

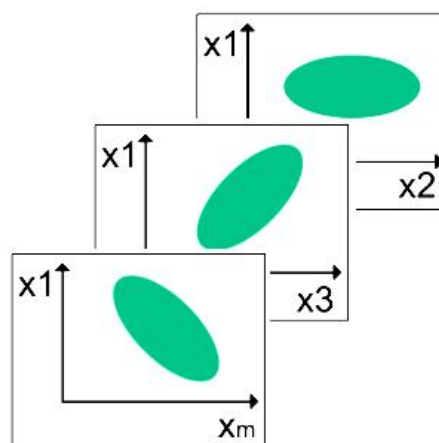


Рис. 1. Корреляция между параметрами

Расчет MD выполняется следующим образом. Определяется исходный набор контролируемых переменных $X [x_1, x_2, \dots, x_n]$, соответствующий ис-

правному состоянию объекта, или обучающая выборка размерностью $[m \times n]$:

$$\begin{bmatrix} x_1(1) & x_2(1) & \dots & x_m(1) \\ x_1(2) & x_2(2) & \dots & x_m(2) \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ x_1(n) & x_2(n) & \dots & x_m(n) \end{bmatrix}, \quad (1)$$

где m – количество контролируемых переменных, n – количество наблюдений.

Затем вычисляется среднее:

$$\bar{x}_i = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n x_i(k) \quad (2)$$

и стандартное отклонение:

$$\sigma_i = \sqrt{\frac{\sum (x_i(k) - \bar{x}_i)^2}{n-1}}. \quad (3)$$

На основе исходного определяется нормализованный набор данных $Z [z_1, z_2, \dots, z_m]$:

$$z_i(k) = \frac{x_i(k) - \bar{x}_i}{\sigma_i}, \quad (4)$$

$$\begin{bmatrix} z_1(1) & z_2(1) & \dots & z_m(1) \\ z_1(2) & z_2(2) & \dots & z_m(2) \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ z_1(n) & z_2(n) & \dots & z_m(n) \end{bmatrix}.$$

После нормализации среднее и стандартное отклонение приобретают соответственно значения “0” и “1”.

Далее рассчитывается корреляционная матрица $R [m \times m]$:

$$S_{ij} = \frac{1}{n-1} \sum_{k=1}^n [z_i(k) \cdot z_j(k)],$$

$$S_i = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{k=1}^n [z_i(k)^2]},$$

$$r_{ij} = \frac{S_{ij}}{S_i \cdot S_j}, \quad (5)$$

$$\begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & \dots & r_{1m} \\ r_{21} & r_{22} & \dots & r_{2m} \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ r_{m1} & r_{m2} & \dots & r_{mm} \end{bmatrix},$$

а затем обратная ей матрица:

$$A = R^{-1}. \quad (6)$$

Если корреляционная матрица вырождается в единичную, то обучающая выборка имеет равномерное распределение по всем параметрам наблюдения. В этом случае MD эквивалентно расстоянию по Эвклиду.

В итоге рассчитывается расстояние Махаланобиса:

$$MD(i) = \frac{1}{m} \begin{bmatrix} z_1(i) & z_2(i) & \dots & z_m(i) \end{bmatrix} A \begin{bmatrix} z_1(i) \\ z_2(i) \\ \vdots \\ z_m(i) \end{bmatrix}. \quad (7)$$

Таким образом, строится исходная шкала, которая в дальнейшем будет использоваться для оценки текущего состояния объекта. Такая оценка производится следующим образом.

Берется тот же набор контролируемых переменных, что и для обучающей выборки, но за другой период работы объекта $Y [y_1, y_2, \dots, y_m]$. Выполняется нормализация текущего набора данных с использованием среднего и стандартного отклонения, полученных на обучающей выборке $Z' [z'_1, z'_2, \dots, z'_m]$:

$$z'_i(k) = \frac{y_i(k) - \bar{x}_i}{\sigma_i}, \quad (8)$$

$$\begin{bmatrix} z'_1(1) & z'_2(1) & \dots & z'_m(1) \\ z'_1(2) & z'_2(2) & \dots & z'_m(2) \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ z'_1(n) & z'_2(n) & \dots & z'_m(n) \end{bmatrix}.$$

Корреляционная и обратная ей матрицы R и A остаются без изменений. После этого рассчитывается расстояние Махаланобиса:

$$MD'(i) = \frac{1}{m} \begin{bmatrix} z'_1(i) & z'_2(i) & \dots & z'_m(i) \end{bmatrix} A \begin{bmatrix} z'_1(i) \\ z'_2(i) \\ \vdots \\ z'_m(i) \end{bmatrix}. \quad (9)$$

Значения MD' , большие, чем MD , будут свидетельствовать о неисправном состоянии объекта.

2. Пример практического применения СМТ

Чтобы на практике проиллюстрировать вышесказанное, выполним пробные расчеты MD с использованием реальных данных – результатов регистрации в эксплуатации параметров энергетической ГТУ типа ГТД-15Э производства ГП НПКГ “Зоря – Машпроект” (общая наработка около 10000 ч). Наблюдаемые параметры следующие:

- приведенная частота вращения компрессора низкого давления $n_{нд пр}$, об/мин;
- приведенная частота вращения компрессора высокого давления $n_{вд пр}$, об/мин;
- приведенное давление за компрессором высокого давления $P_{квд пр}$, кПа;
- приведенная температура газов за турбиной низкого давления $T_{тнд пр}$, °С.

В качестве обучающей выборки использовались вышеуказанные параметры, зарегистрированные на установившихся рабочих режимах при мощ-

ности 11...12 МВт после 400 ч наработки.

В качестве контрольной выборки использовались те же параметры на аналогичных режимах, но после наработки 5500 ч. В этой зоне по методике, изложенной в Руководстве по эксплуатации ГТУ, было диагностировано загрязнение проточной части компрессора, что подтвердилось визуальным осмотром двигателя. На рис. 2 приведен внешний вид проявления неисправности по диагностическому параметру – $\Delta T_{\text{ТНД пр}}$, рассчитанному по измеряемым параметрам.

При расчетах по методике, указанной в разделе 1, при использовании параметров, характеризующих исправное состояние двигателя, получено среднее значение MD равное 0,98835.

Это значение неплохо совпадает с рекомендуемым в [5] для обучающих выборок:

$$MD_{\text{норм}} = \frac{n-1}{n} = 0,995.$$

На рис. 3 приводятся значения MD для двух выборок, при этом значения MD, полученные по контрольной выборке, существенно больше, чем те, которые получены по обучающей. Это позволяет сделать вывод о хорошей чувствительности СМТ при диагностировании данного вида неисправности.

3. Этапы и варианты СМТ

Указанный выше порядок расчета MD является только начальным шагом в использовании СМТ при диагностировании. Процедура СМТ в ее классическом представлении состоит из четырех этапов [3]:

Этап 1. Создание измерительной шкалы для пространства Махаланобиса (пространства единиц измерения) как образца.

На этом этапе выполняется выбор переменных, которые определяют нормальное состояние объекта. Далее выполняются накопление и регистрация данных по всем этим переменным. После этого производится расчет MD по схеме раздела 1 и эти MD используются как исходные.

Этап 2. Оценка пространства единиц измерения.

На этом этапе идентифицируются аномальные состояния объекта, вычисляются значения MD для этих состояний с использованием средних, стандартных отклонений и корреляционной матрицы, полученных на этапе 1. Если выбранная шкала хороша, то значения MD, соответствующие аномальным состояниям, должны иметь большие значения. Другими словами, значения MD всех состояний за пределами пространства Махаланобиса должны быть легко различимы.

Этап 3. Определение значимых переменных (этап совершенствования).

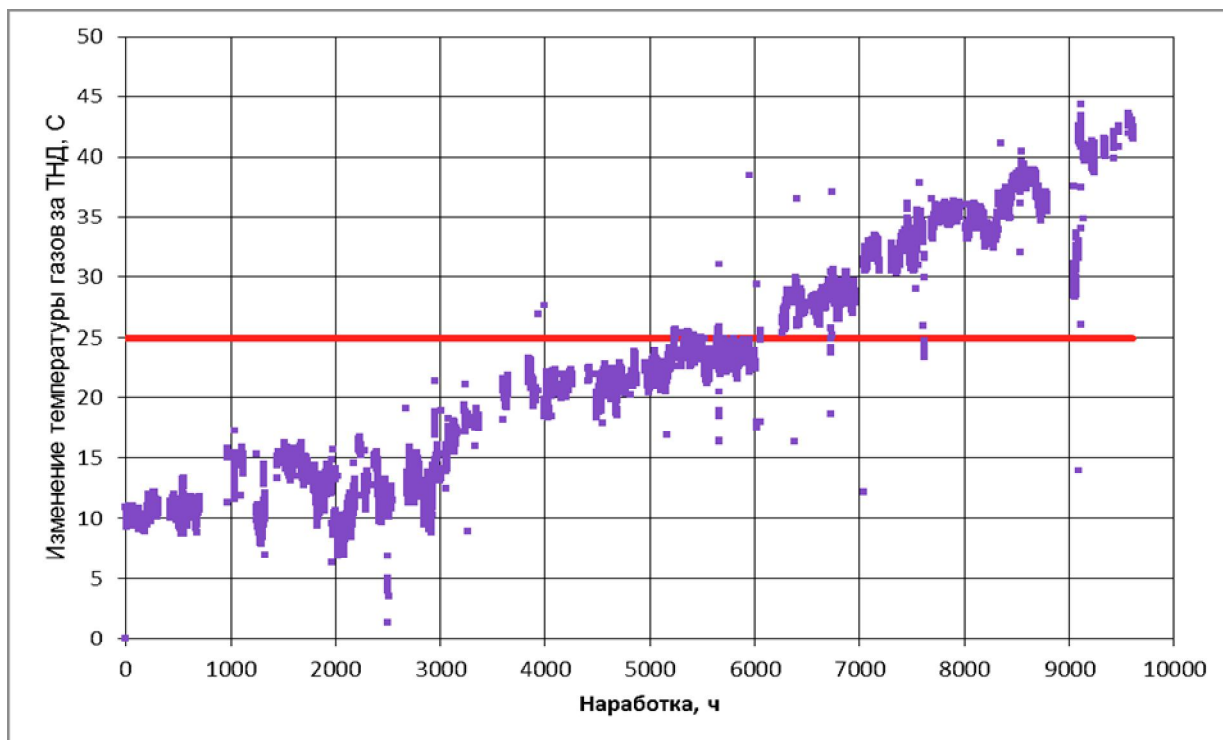


Рис. 2. Проявление загрязнения проточной части двигателя:
■ – результаты регистрации; – - эксплуатационный допуск

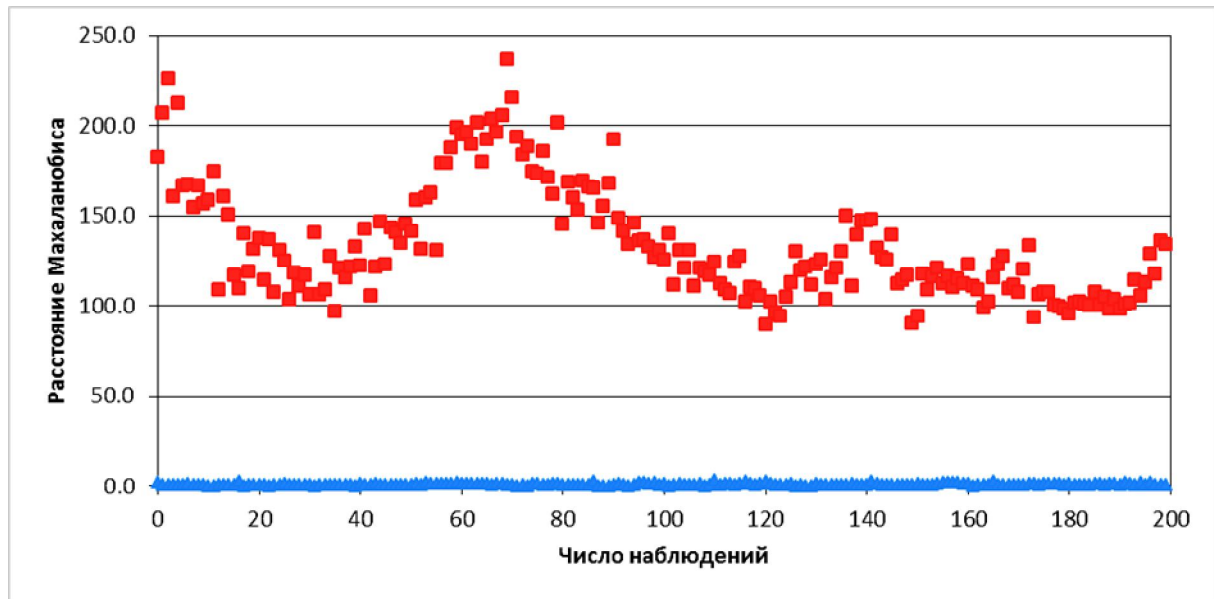


Рис. 3. Сравнение значений MD, полученных по разным выборкам параметров:
 ▲ - обучающая выборка; ■ - контрольная выборка

На этом этапе находится набор значимых переменных, для чего применяются ортогональные массивы/преобразования (ОА) и соотношения “сигнал/шум” (S/N). Значения S/N, полученные из аномальных состояний, используются как отклик для всех комбинаций ОА. Набор значимых переменных получается благодаря оценке прироста (gain) значений S/N.

Этап 4. Диагностирование с использованием значимых переменных.

На этом этапе появляется возможность использования СМТ по прямому назначению, используя шкалу, полученную с помощью набора значимых переменных. При этом могут потребоваться корректирующие действия, в частности необходимо назначить допуски.

Рассмотренный ранее пример может быть использован для оценки вклада каждой из четырех переменных (факторов) в изменение значения MD. При этом используется подходящий ортогональный массив L_8 (таблица 1), имеющий два состояния: 1 – когда переменная используется и 2 – когда нет. Такой подход по уменьшению количества значимых переменных (факторов) часто используется в задачах теории планирования эксперимента [6].

Рассматривая алгоритм из раздела 1 в такой постановке можно вычислить значения MD для всех комбинаций, а также значение S/N:

$$S/N = \eta_q = -10 \log \left[\frac{1}{t} \sum_{i=1}^t \left(\frac{1}{MD(i)^2} \right) \right], \quad (10)$$

где t – количество неисправных состояний.

Таблица 1
 Ортогональный массив $L_8 (2^7)$

Перем./ Эксп.	1	2	3	4	5	6	7
	x1	x2	x3	x4			
1	1	1	1	1	1	1	1
2	1	1	1	2	2	2	2
3	1	2	2	1	1	2	2
4	1	2	2	2	2	1	1
5	2	1	2	1	2	1	2
6	2	1	2	2	1	2	1
7	2	2	1	1	2	2	1
8	2	2	1	2	1	1	2

По этим S/N определяется прирост (gain), равный разнице S/N для экспериментов, где переменная используется и где переменная не используется. Положительное значение gain свидетельствует о значимости переменной [3].

Заключение

Наибольшим недостатком СМТ является чувствительность к качеству корреляционной матрицы. Известно, что большинство измеряемых параметров проточной части ГТД сильно коррелированы. Преодолеть этот недостаток можно используя для построения пространства Махаланобиса не измеряемые параметры, а диагностические комплексы, например, отклонения от нормы. Кроме того, существует вариант СМТ с использованием процесса ортогонализации Грама-Шмидта, так называемая СМТГ.

Улучшению чувствительности и точности СМТ способствуют также использование так называемых “динамических” S/N, коэффициентов частичной корреляции, и другие способы. Однако их рассмотрение и анализ выходят за рамки данной статьи.

В целом же можно сделать вывод о перспективности использования СМТ для диагностирования неисправностей ГТД, в том числе в комбинации, например, с методом главных компонент, вероятностными нейронными сетями, кластерным анализом, где значение MD может использоваться как мера близости к тому или иному классу технического состояния ГТД.

Литература

1. Синтез систем управления и диагностирования газотурбинных двигателей [Текст] : монография / С. В. Епифанов, В. И. Кузнецов, И. И. Богаченко [и др.]. – К. : Техника, 1998. – 312 с.
2. Kumano, S. *Advanced gas turbine diagnostics*

using pattern recognition [Text] / S. Kumano, N. Mikami, K. Aoyama // Proceedings of ASME Turbo Expo 2011 GT2011-45670. – 9 p.

3. Taguchi, G. *The Mahalanobis-Taguchi strategy. A pattern technology system [Text] / G. Taguchi, R. Jugulum. – New York : John Wiley & Sons, 2002. – 235 p.*

4. Chen, S. *ECU Software Abnormal Behavior Detection Based On Mahalanobis-Taguchi Technique [Text] / S. Chen, J. Phillips // SAE Technical Paper 2008-01-1219. – 9 p.*

5. Rai, B. *Prediction of drill-bit breakage from degradation signals using Mahalanobis-Taguchi system [Text] / B. Rai, R. Babu, N. Singh // Int. J. Industrial and Systems Engineering. – 2008. – Vol. 3, No. 2. – P. 134-148.*

6. *A Comparison of the Mahalanobis-Taguchi System to A Standard Statistical Method for Defect Detection [Text] / E. Cudney, D. Drain, K. Paryani [et al.] // Journal of Industrial and Systems Engineering. – 2009. – Vol. 2, No. 4. – P. 250-258.*

Поступила в редакцию 30.05.2015, рассмотрена на редколлегии 22.06.2015

Рецензент: д-р техн. наук, проф. Б. О. Демьянчук, Военная академия, Одесса.

ВИКОРИСТАННЯ СИСТЕМИ МАХАЛАНОБІСА-ТАГУТІ У ЗАДАЧАХ РОЗПІЗНАВАННЯ НЕСПРАВНОСТЕЙ ГТД

В. В. Нерубаський

Наведено опис основних особливостей системи Махаланобіса-Тагуті як ймовірносно-аналітичного методу визначення технічного стану ГТД. Теоретичні відомості підкріплено прикладами практичного використання системи Махаланобіса-Тагуті для діагностування несправностей проточної частини ГТД. Описано етапи використання системи Махаланобіса-Тагуті та процедура визначення значущих змінних з використанням ортогональних масивів і співвідношень "сигнал/шум". Даються рекомендації щодо усунення недоліків системи Махаланобіса-Тагуті та напрямки подальших робіт.

Ключові слова: система технічної діагностики, параметрична діагностика, розпізнавання образів несправностей, система Махаланобіса-Тагуті, відстань Махаланобіса.

USING MAHALANOBIS-TAGUCHI SYSTEM IN TASKS RELATED TO THE TURBINE ENGINE FAULT RECOGNITION

V. V. Nerubasskiy

The description of the main features of the Mahalanobis-Taguchi system as probabilistic- analytical method for determining the technical condition of the turbine engine is bring out. Theoretical information supported by examples of practical use of the Mahalanobis-Taguchi system to diagnose turbine engine flow part faults. It is described the steps for using the Mahalanobis-Taguchi system and procedure for determining the significant variables using orthogonal arrays and relations "signal/noise". Recommendations to remove the deficiencies in the of the Mahalanobis-Taguchi system and the way forward are added.

Key words: technical diagnostics system, parametrical diagnostics, fault pattern recognition, Mahalanobis-Taguchi system, Mahalanobis distance.

Нерубаський Вадим Владимирович – науч. сотр., нач. бюро программного обеспечения, АО «Элемент», Одесса, Украина, e-mail: vnerubaskiy@yandex.ua.