

МЕТОДИКА СИНТЕЗА КРИТЕРИЕВ ОЦЕНКИ СОСТОЯНИЯ ГАЗОТУРБИННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

© 2013 Н.А. Зотин

Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королёва
(национальный исследовательский университет)

Поступила в редакцию 02.12.2013

В данной статье автор описывает методику синтеза критериев оценки состояния газотурбинных двигателей в рамках семантики теории образов и теории множеств.

Ключевые слова: конфигурация, пространство множеств, архитектоника, диагностирование газотурбинных двигателей, метрическое пространство.

В настоящее время формирование критериев определения технического состояния газотурбинного двигателя (ГТД) является процессом, основанным на опыте и знаниях целых исследовательских коллективов, во многих случаях требующим индивидуального подхода и высокой квалификации научных и инженерных кадров.

В связи с этим появляется необходимость создания формализованной методики синтеза критериев контроля и прогнозирования технического состояния (ТС) авиационных ГТД. В данной статье автор рассматривает разработанную методику, используя семантику теории множеств и теории образов в связи с тем, что с их позиций возможно описывать объекты любой сложности и природы.

Согласно терминологии [1] полностью и всесторонне описанный любой объект называется образом. На практике осуществимо описание образа только идеального объекта, которое используется для установления аналитических связей между его параметрами. Потенциально возможное описание реального объекта есть его изображение.

Любое изображение объекта в общем виде представляет собой трёхкомпонентную систему [2]:

$$G = \langle M, T, D_M \rangle,$$

где M – множество, характеризующее пространственную структуру объекта – архитектонику; T – хроноструктура, то есть структура изменения параметров архитектуры во времени; D_M – диапазон допустимых изменений параметров архитектуры; при выходе хотя бы одного параметра за этот диапазон объект перестаёт быть самим собой.

В общем виде $M = \{m_1, m_2, \dots, m_{n_M}\}$, где m_i – подмножество параметров, производного в рамках данной задачи i -того элемента объекта:

$$m_i = \{g_i, k_i, \rho_i\},$$

где g_i – подмножество параметров, характеризующих геометрию элемента; k_i – подмножество параметров, характеризующих расположение элемента по отношению к остальным элементам; ρ_i – подмножество параметров, характеризующих природу элемента.

В общем виде хроноструктуру можно представить как функцию

$$T(M, t),$$

где t – время. Изменение архитектуры во времени обусловлено воздействием на неё “внешней средой”. В данном контексте под “внешней средой” понимается совокупность всех воздействий на объект извне, включая воздействия субъекта.

Также хроноструктуру можно представить множеством, если в ней отражено изменение параметров дискретно:

$$T = \{ \{M_1^*, t_1^*\}, \{M_2^*, t_2^*\}, \dots, \{M_{n_T}^*, t_{n_T}^*\} \},$$

где t_i^* – конкретные значения времени, $M_i^* = \{m_{i1}^*, m_{i2}^*, \dots, m_{in_M}^*\}$, $m_{ij}^* = \{g_{ij}^*, k_{ij}^*, \rho_{ij}^*\}$, $g_{ij}^*, k_{ij}^*, \rho_{ij}^*$ – конкретные элементы множеств $g_{ij}, k_{ij}, \rho_{ij}$ соответственно.

Диапазон допустимых изменений параметров архитектуры представим множеством

$$D_M = \{d_{M1}, d_{M2}, \dots, d_{n_{D_M}}\},$$

где $d_{M1}, d_{M2}, \dots, d_{n_{D_M}}$ – подмножества диапазонов допустимых изменений параметров:

$$d_{Mi} = \{d_{Mgi}, d_{Mki}, d_{M\rho i}\},$$

где $d_{Mgi} = [g_{i\min}; g_{i\max}]$, $d_{Mki} = [k_{i\min}; k_{i\max}]$,

$$d_{M\rho i} = [\rho_{i\min}; \rho_{i\max}].$$

Вышеописанное представление изображение объекта трёхкомпонентной структурой $G = \langle M, T, D_M \rangle$ будем называть первичным, так как все остальные параметры объекта являются производными от его архитектуры.

Зотин Никита Александрович, аспирант кафедры эксплуатации авиационной техники. E-mail: eat@ssau.ru

Множество технических состояний объекта $G = \langle M, T, D_M \rangle$ есть множество первичных представлений $C = \{C_1, C_2, \dots, C_{n_C}\}$, где $C_i = \langle M_i, T_i, D_{M_i} \rangle$. Причём

$$M = \bigcup_{i=1}^{n_C} M_i, T = \bigcup_{i=1}^{n_C} T_i, D_M = \bigcup_{i=1}^{n_C} D_{M_i}.$$

Для субъекта не всегда необходимо полное описание объекта, и представляет интерес лишь его часть; а осуществить первичное описание в большинстве случаев либо не представляется возможным, либо не рационально. Поэтому решение некоторых задач, включая задачи технической диагностики, сводится к описанию некоторого аспекта изображения объекта – конфигурации, как правило, параметрами производными от архитектуры.

Для определения технического состояния, в котором находится объект, необходимо оценить объект по результату его работы – эффекту. Из-за того, что объект не может существовать без «внешней среды», и исключить её влияние на объект невозможно, следовательно, субъект познаёт (или оценивает) объект исходя из результатов его взаимодействия с «внешней средой», иными словами на основании эффекта системы объект-«внешняя среда».

Оформим параметры «внешней среды» множеством $N = \{n_1, n_2, \dots, n_{n_N}\}$; возможные эффекты множеством $E = \{E_1, E_2, \dots, E_{n_E}\}$; параметры, характеризующие эффект (назовём их параметры эффекта) множеством $P_E = \{p_{E1}, p_{E2}, \dots, p_{E n_{P_E}}\}$; критерии эффекта множеством $D_E = \{d_{E1}, d_{E2}, \dots, d_{E n_{D_E}}\}$, каждый элемент множества D_E выглядит следующим образом:

$$d_{Ei}: \bigwedge_{j=1}^{n_{P_E}} (p_{Ej} \in [d_{Eij_{min}}; d_{Eij_{max}}]) \Rightarrow E^* = E_i,$$

где E^* – эффект системы объект – «внешняя среда».

Если M – область значений M , N – область значений N ; то область значений i -того параметра эффекта p_{Ei} является образом (не путать с образом в [1]) декартова произведения множеств M и N , полученным по закону $f_{M \times N}^{p_{Ei}}$:

$$f_{M \times N}^{p_{Ei}}: M \times N \rightarrow p_{Ei} \text{ ИЛИ}$$

$$f_{M \times N}^{p_{Ei}}: \prod_{i=1}^{n_M} m_i \times \prod_{i=1}^{n_N} n_i \rightarrow p_{Ei}$$

где m_i и n_i – области значений m_i и n_i соответственно.

Если множества E и C сформированы таким образом, что одно является биективным отображением другого, то есть существует закон $f_E^C: E \leftrightarrow C$, то справедливо:

$$E^* = E_i \Rightarrow C^* = C_i,$$

где C^* – ТС, в котором находится объект.

Следовательно, в данном случае параметры эффекта являются первичными параметрами ТС.

Использовать первичные параметры ТС не всегда рационально, поэтому, как правило, используют вторичные (диагностические) параметры, измерение которых целесообразно.

Оформим диагностические параметры множеством $P = \{p_1, p_2, \dots, p_{n_P}\}$, диагностические

признаки множеством $S = \{s_1, s_2, \dots, s_{n_S}\}$, кри-

терии ТС множеством $D_C = \{d_{C1}, d_{C2}, \dots, d_{C n_{D_C}}\}$, каждый элемент множества D_C выглядит следующим образом:

$$d_{Ci}: \bigwedge_{j=1}^{n_S} (s_j \in [d_{Cij_{min}}; d_{Cij_{max}}]) \Rightarrow C^* = C_i.$$

Если p_i – область значений p_i ; то p_i является образом декартова произведения множеств P_{Ei} , полученным по закону $f_{P_E}^{p_i}$:

$$f_{P_E}^{p_i}: \prod_{i=1}^{n_{P_E}} p_{Ei} \rightarrow p_i$$

Если s_i – область значений s_i ; то s_i является образом декартова произведения множеств p_i , полученным по закону $f_P^{s_i}$:

$$f_P^{s_i}: \prod_{i=1}^{n_P} p_i \rightarrow s_i$$

Если определить аналитически отображения $f_{M \times N}^{p_{Ei}}, f_{P_E}^{p_i}, f_P^{s_i}$ затруднительно, как в случае сложного многоэлементного объекта диагностики – ГТД, то диагностические признаки целесообразно сформировать эмпирически.

Рассмотрим такой способ определения диагностических признаков для некоторого ТС ГТД C^* .

Параметры «внешней среды», которые субъект контролирует, формируют множество $X = \{x_1, x_2, \dots, x_{n_X}\}$; параметры «внешней среды» неконтролируемых воздействий обозначим $Z = \{z_1, z_2, \dots, z_{n_Z}\}$; параметры эффекта обозначим $Y = \{y_1, y_2, \dots, y_{n_Y}\}$.

Таким образом, зная параметры “внешней среды” и эффекта, можно сформировать множество $A = \{X, Y, Z\}$, описывающее состояние ГТД. Такое множество назовём характеристическое. Как правило, непосредственно данное субъекту характеристическое множество представляет для него набор разрозненных величин, и пригодно для решения задач диагностики только после ряда преобразований.

Если на все экземпляры ГТД подавать одни и те же (стандартные) воздействия, или на основании полученных откликов при различных воздействиях определять те отклики, которые бы возникли при стандартных воздействиях, то характеристическое множество $A = \{X, Y, Z\}$ преобразуется в множество вида $A_c = \{y_{c1}, y_{c2}, \dots, y_{cn_y}\}$, где $y_{c1}, y_{c2}, \dots, y_{cn_y}$ – параметры эффекта при стандартной «внешней среде». Полученное множество A_c назовём приведённым характеристическим множеством.

В качестве характеристик ГТД могут выступать дроссельные характеристики регистрируемых за один полёт параметров, приведённых к стандартным условиям. Одной из форм представления дроссельной характеристики каждого i -того параметра может быть множество

$B_i = \{b_{i1}, b_{i2}, \dots, b_{in_{B_i}}\}$, где $b_{i1}, b_{i2}, \dots, b_{in_{B_i}}$ – коэффициенты полинома степени n_i , которым описывается дроссельная характеристика. Таким образом, приведённое характеристическое множество ГТД имеет следующий вид:

$$A_c = \{B_1, B_2, \dots, B_m\},$$

при условии, что в полёте регистрировалось $m + 1$ параметров ГТД: для m параметров строятся дроссельные характеристики, а один параметр используется в качестве режимного.

Если b_{ij} область значений параметра b_{ij} , то графически ТС ГТД, оформленное характеристическим множеством, можно отобразить точкой $A_c(b_{11}, b_{12}, \dots, b_{ij}, \dots, b_{mn_{B_m}})$ в метрическом пространстве, образованном декартовым произведением множеств:

$$\mathbb{B} = \prod_{i=1}^m \prod_{j=1}^{n_{B_i}} b_{ij},$$

с метрикой B . В случае неточного определения элементов b_{ij} – можно отобразить область в этом пространстве. Мету различия между техническими состояниями соответствующими одному и тому же двигателю, но в разные полёты будем определять метрикой:

$$B(A_{ct_i}, A_{ct_{i+1}}),$$

где A_{ct_i} – приведённое характеристическое множество ГТД, соответствующему полёту, начавшемуся в момент времени t_i , $A_{ct_{i+1}}$ – приведённое характеристическое множество ГТД, соответствующему полёту, начавшемуся в момент времени t_{i+1} ; причём разница $(t_{i+1} - t_i)$ складывается из времени работы двигателя.

Зная скорость изменения конфигурации

$$V = \frac{B(A_{ct_i}, A_{ct_{i+1}})}{t_{i+1} - t_i},$$

можно определить конфигурацию в будущий момент времени, т.е. решить задачу прогнозирования параметров работы ГТД.

Выберем в качестве признака ТС C^* метрику $B(A_{ct_0}, A_{ct})$, где A_{ct_0} – приведённое характеристическое множество ГТД на момент времени t_0 , соответствующий началу эксплуатации ГТД или после его капитального ремонта; A_{ct} – приведённое характеристическое множество ГТД на момент времени t , при котором конфигурация ГТД отвечает признакам объектов данного класса технических состояний.

Для определения метрики эмпирическим способом сформируем контрольную и экспериментальную группу экземпляров ГТД. Контрольная группа состоит из двигателей, которые за ряд полётов не достигли ТС C^* . В экспериментальной наоборот, все двигатели за ряд полётов достигли технического состояния C^* . В результате для каждого ГТД в экспериментальной группе будет справедливо неравенство

$$B_{\mathcal{E} \min} \leq B(A_{ct_0}, A_{ct}) \leq B_{\mathcal{E} \max}, \text{ а для каждого ГТД из контрольной группы - } B_{K \min} \leq B(A_{ct_0}, A_{ct}) \leq B_{K \max}.$$

Если промежутки $[B_{\mathcal{E} \min}, B_{\mathcal{E} \max}]$ и $[B_{K \min}, B_{K \max}]$ не пересекаются, то метрика $B(A_{ct_0}, A_{ct})$ приемлема в качестве диагностического признака состояния C^* . В случае если промежутки пересекаются необходимо задать другую метрику пространства \mathbb{B} , так как при попадание значения признака в область пересечения однозначно определить ТС ГТД будет невозможно.

Условие оптимального диагностического признака следующее:

$$\begin{aligned} \forall B_K \in [B_{K \min}, B_{K \max}] \wedge \\ \forall B_{\mathcal{E}} \in [B_{\mathcal{E} \min}, B_{\mathcal{E} \max}], \\ B(B_K, B_{\mathcal{E}}) \rightarrow \max. \end{aligned}$$

Для реализации описанной выше методики на данный момент в программной среде Labview разработано приложение, которое реализует следующие функции:

- считывание данных из полётных файлов;
- усреднение значений параметров на указанном промежутке времени;
- устранение выбросов значений параметров;
- приведение значений параметров к стандартным атмосферным условиям;
- построение дроссельных характеристик параметров.

Планируется доработать приложение таким образом, чтобы в нём на основании данных наблюдения происходило вычисление метрики-признака технического состояния.

Вывод. В статье представлена модель описа-

ния технического состояния ГТД с применением теории множеств, описан алгоритм выбора диагностических признаков. Приведены разработанные автором средства реализации описанной методики.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Гренандер У.* Лекции по теории образов: в 3-х т. [пер. с англ. И. Гуревича; под ред. Ю. Журавлёва]. М.: Мир.
2. *Каган М.С.* Система и структура // В кн.: Системные исследования; Методологические проблемы. Ежегодник. 1983. М., 1983. С. 86-106.

THE METHODOLOGY OF GAS TURBINE ENGINES TECHNICAL STATE ASSESSMENT CRITERIONS SYNTHESIS

© 2013 N.A. Zotin

Samara State Aerospace University named after Academician S.P. Korolyov
(National Research University)

In this paper authors describe methodology of gas turbine engines technical state assessment criterions synthesis using pattern theory and set theory.

Key words: configuration, space of sets, architectonics, gas turbine engines diagnostics, metric space.