

УДК 621.431.75

## ЗАДАЧА КОНТРОЛЯ И ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ГАЗОТУРБИННОГО ДВИГАТЕЛЯ

© 2014 Н. А. Зотин

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

В статье представлена в вербальной и математической формулировке задача контроля и прогнозирования технического состояния газотурбинного двигателя. Математическая формулировка задачи дана в виде трёхкомпонентной системы. Система включает в себя: исходные данные для решения задачи; набор условий и ограничений, которые должны быть выполнены в процессе решения задачи; требуемый результат, который необходимо достичь при решении задачи.

Исходные данные для решения задачи включают в себя: множества зарегистрированных в различные моменты времени значений параметров силовой установки и параметров внешней среды, а также наборы экспертных заключений о техническом состоянии газотурбинных двигателей.

Ограничениями, которые накладываются при решении задачи, являются фиксированный перечень регистрируемых параметров силовой установки, а также отсутствие возможности целенаправленно расширять базу эмпирических данных.

Требуемым результатом, который необходимо достичь при решении задачи, являются модель определения контрольных, диагностических, прогностических параметров; функция вычисления признаков технического состояния; функция экстраполяции значений признаков технического состояния; множество критериев контроля, диагностики и прогнозирования.

Каждый из перечисленных компонентов задачи раскрыт в статье с использованием семантики множеств и мультимножеств.

*Контроль, прогнозирование, газотурбинный двигатель, постановка задачи, контрольные и прогностические параметры, контрольные и прогностические признаки, мультимножество.*

Одной из основных задач в сфере эксплуатации газотурбинных двигателей (ГТД) является задача установления их технического состояния (ТС) и закона его изменения.

В настоящее время существует ряд методов, которые частично решают задачу контроля и прогнозирования ТС ГТД.

К наиболее объективным существующим методам визуального контроля ГТД следует отнести эндоскопический и рентгенографический. Основным недостатком этих методов является отсутствие возможности их оперативного применения ввиду того, что они трудоёмки, продолжительны и иногда требуют демонтажа ГТД с борта летательного аппарата (ЛА) [1, 2].

Параметрический контроль [3] более оперативен, так как может быть проведён без демонтажа ГТД с борта ЛА. Однако демонтаж силовой установки при её диа-

гностировании позволяет расширить перечень измеряемых параметров двигателя, повысить точность их измерения и обеспечить возможность управлять внешней средой, в которой находится ГТД.

Трендовый анализ является частным случаем параметрического контроля, так как в его основе лежит обработка зарегистрированных в полёте данных о параметрах ГТД.

В случае обеспечения достаточного уровня объективности общим недостатком параметрических методов является их ориентированность на определённую модель двигателя. Заявленные «универсальные» методы и средства оценки ТС ГТД используют обобщённые критерии оценки технического состояния и в целях повышения их объективности требуют доработок для каждого отдельного экземпляра двигателя.

Отдельным видом контроля ТС ГТД являются методы с применением нейросетевых моделей [4, 5, 6]. Однако при всей своей гибкости они пока не нашли широкого применения и находятся на стадии разработок.

Поэтому существует актуальная задача создания оперативных методов контроля, прогнозирования, диагностики ТС ГТД и средств их реализации на основе анализа полётных данных, которые обеспечивают:

- формирование контрольных и прогностических признаков для любого конкретного экземпляра ГТД (или группы экземпляров);

- объективный контроль и прогнозирование на основе сформированных признаков.

Данная задача может быть представлена трёхкомпонентной системой:

$$\mathcal{K} = [\mathcal{K}_3, \mathcal{K}_{тр}, \mathcal{K}_{усл}], \quad (1)$$

где  $\mathcal{K}_3$  – исходные данные для решения задачи;  $\mathcal{K}_{тр}$  – результат, который необходимо достичь при решении задачи;  $\mathcal{K}_{усл}$  – условия и ограничения, которые должны быть выполнены в процессе решения.

Рассмотрим каждый компонент системы (1).

### 1. Исходные данные для решения задачи разработки методов формирования контрольных и прогностических признаков ТС ГТД и методов контроля и прогнозирования ТС ГТД.

Ввиду того, что аналитическое описание ГТД не обеспечивает построение его точных моделей [7], то разрабатываемые методы и средства будут основываться на анализе эмпирических данных.

На данный момент для разработки указанных методов и средств существует объёмная база данных, представленная множеством полётных файлов, записанных бортовыми автоматизированными системами контроля. Каждый файл содержит зарегистрированные значения параметров систем самолёта и условий по-

лёта с частотой от 1 до 25 Гц в зависимости от наименования параметра.

К регистрируемым параметрам ГТД относятся: частота вращения ротора вентилятора двигателя, ротора турбины высокого давления, ротора турбины среднего давления; угол установки рычага управления двигателем; температура газов за турбиной среднего давления двигателя; общая степень повышения давления в компрессорах двигателя; расход топлива двигателя; вибросмещение вентилятора по переднему датчику вибрации, по заднему датчику вибрации; виброскорость турбокомпрессора по переднему датчику вибрации, по заднему датчику вибрации; суммарная степень повышения давления по высотной градуировочной характеристике, по наземной градуировочной характеристике в двигателе и др.

К регистрируемым параметрам внешних условий относятся: температура наружного воздуха, заторможенного потока наружного воздуха; давление наружного воздуха и др.

Формально значения параметров, записанных в полётный файл, можно представить мультимножеством

$$U = \{k(u_1) \cdot u_1, k(u_2) \cdot u_2, \dots, k(u_i) \cdot u_i, \dots, k(u_{n_U}) \cdot u_{n_U}\},$$

где  $k(u_i) \cdot u_i$  – компонент мультимножества  $U$ , содержащий все измеренные за полёт  $k(u_i)$  раз значения параметра  $u_i$ ;  $n_U$  – число регистрируемых параметров. В формальной записи

$$U = \{k(u_i) \cdot u_i\}_{i=1}^{n_U}. \quad (2)$$

Перечень регистрируемых параметров является опорным множеством  $SuppU$  мультимножества  $U$ :

$$SuppU = \{u_1, u_2, \dots, u_i, \dots, u_{n_U}\} = \{u_i\}_{i=1}^{n_U}, \quad (3)$$

где  $u_i$  – регистрируемый параметр.

Следует отметить, что поскольку каждый из полётных файлов описывает совершившийся полёт, то известно и случившееся в течение него (если оно было) авиационное происшествие, связанное с двигателем. Следовательно, известны и состояния двигателей на начало полётов, которые уже произошли.

Таким образом, в рамках предоставленной информации, каждый  $j$ -й полёт можно описать парой

$$[U, s_k]^j,$$

где  $U$  в паре  $[U, s_k]^j$  – мультимножество зарегистрированных значений параметров за  $j$ -й полёт;  $s_k$  в паре  $[U, s_k]^j$  – техническое состояние ГТД на начало  $j$ -го полёта.

База полётных файлов состоит из хронологически структурированных наборов, соответствующих истории эксплуатации множества экземпляров ГТД:

$$W = \{W_i\}_i^{n_W},$$

где  $W$  – множество экземпляров ГТД;  $W_i$  –  $i$ -й образец ГТД;  $n_W$  – количество образцов ГТД.

Таким образом, множество эмпирических данных представлено множеством пар

$$\left\{ \left\{ [U, s_k]^{i,j} \right\}_{j=1}^{N_i} \right\}_{i=1}^{n_W}.$$

Здесь  $U$  в паре  $[U, s_k]^{i,j}$  – мультимножество зарегистрированных значений параметров за  $j$ -й полёт  $i$ -го образца ГТД;  $s_k$  в паре  $[U, s_k]^{i,j}$  – техническое состояние ГТД на начало  $j$ -го полёта  $i$ -го образца ГТД;  $N_i$  – количество полётов  $i$ -го образца ГТД;  $n_W$  – количество образцов ГТД.

Таким образом, исходные данные для решения задачи  $\mathcal{K}_3$  (1) имеют вид:

$$\mathcal{K}_3 = \left\{ \left\{ [U, s_k]^{i,j} \right\}_{j=1}^{N_i} \right\}_{i=1}^{n_W}. \quad (4)$$

## 2. Результат, который необходимо достичь при решении задачи разработки методов формирования контрольных и прогностических признаков ТС ГТД и методов контроля и прогнозирования ТС ГТД.

Для получения результата требуется:

2.1. Из первичной информации, представленной в полётных файлах разрозненным множеством величин различных параметров, выделить те из них, на основании которых можно сформировать диагностические признаки. Другими словами, построить модель  $M_{SuppU}^{SuppV}$  выделения множества  $SuppV$  из надмножества  $SuppU$  (3):

$$SuppV = \{v_i\}_{i=1}^V,$$

где  $SuppV$  – множество контрольных и прогностических параметров,  $SuppV \subset SuppU$ ;  $SuppU$  – перечень регистрируемых параметров (3);  $v_i$  – контрольный и прогностический параметр из множества  $SuppV$ .

Зарегистрированные в течение полёта контрольные и прогностические параметры представляют мультимножество

$$V = \{k(v_i) \cdot v_i\}_{i=1}^{n_V}, \quad (5)$$

где  $k(v_i) \cdot v_i$  – компонент мультимножества  $V$ , содержащий все измеренные за полёт  $k(v_i)$  раз значения параметра  $v_i$ .

2.2. Получить функцию  $F_V^B$  вычисления множества значений контрольных и прогностических признаков  $B$  на основании множества зарегистрированных значений параметров  $V$  (5). Множество контрольных и прогностических признаков имеет вид

$$B = \{b_i\}_{i=1}^{n_B},$$

где  $b_i$  –  $i$ -й контрольный и прогностический признак;  $n_B$  – число контрольных и прогностических параметров.

2.3. Сформировать множество  $K$  критериев контроля и прогнозирования ТС ГТД:

$$K = \{k_j\}_{j=1}^{n_s}$$

где  $k_j$  – критерий принадлежности ГТД к ТС  $s_j$ ,  $s_j \in S = \{s_j\}_{j=1}^{n_s}$ ;  $s_j$  –  $j$ -е состояние ГТД из множества  $S$ ;  $S$  – множество ТС ГТД;  $n_s$  – количество ТС ГТД.

Каждый критерий имеет вид

$$k_j: \left[ \left[ \bigwedge_{i=1}^{n_B} [b_i \in d_j(b_i)] \right] = true \right] \Rightarrow \Rightarrow W_k = W^{s_j},$$

где  $k_j$  – критерий принадлежности ГТД к ТС  $s_j$ ;  $b_i$  –  $i$ -й контрольный и прогностический признак;  $d_j(b_i)$  – область значения признака  $b_i$ , соответствующая ТС  $s_j$ ;  $true$  – достоверное событие (истинное высказывание);  $W = W^{s_j}$  – символьная запись того, что объект  $W$  находится в состоянии  $s_j$ .

Множество критериев прогнозирования идентично множеству критериев контроля, за исключением того, что критерии контроля применяются к признакам ТС ГТД, определённым в настоящий момент времени, а критерии прогнозирования ТС – к признакам, значения которых вычисляются для будущего момента времени.

2.4. Для решения задачи прогнозирования получить функции экстраполяции значений контрольных и прогностических признаков, которые составляют множество

$$f = \{b_i(t_{np}) = f(t_{np}, \{[b_i, t]_j\}_{j=1}^{n_{t_0}})\}_{i=1}^{n_B}.$$

Здесь  $f$  – множество функций экстраполяции;  $b_i(t_{np})$  – зависимость значения признака  $b_i$  от будущего момента времени  $t_{np}$ , для которого прогнозируется ТС;

$f(t_{np}, \{[b_i, t]_j\}_{j=1}^{n_{t_0}})$  – функция экстраполяции;  $t_{np}$  – время, соответствующее экстраполируемому значению признака  $b_i$ ;  $\{[b_i, t]_j\}_{j=1}^{n_{t_0}}$  – множество пар, каждая из них содержит значение момента времени  $t$  и вычисленное значение признака  $b_i$  в этот момент;  $n_{t_0}$  – количество вычисленных значений признака  $b_i$  до момента времени  $t_0$  (настоящего момента времени);  $n_B$  – число контрольных и прогностических параметров.

Таким образом, виртуальная модель желаемого состояния предмета  $\mathcal{K}_{mp}$  (1) имеет вид тетрады:

$$\mathcal{K}_{тр} = [M_{SuppU}^{SuppV}, F_V^B, f, K], \quad (6)$$

где  $M_{SuppU}^{SuppV}$  – модель выделения контрольных и прогностических параметров из множества регистрируемых;  $F_V^B$  – функция вычисления множества значений контрольных и прогностических признаков на основании множества зарегистрированных значений параметров;  $f$  – множество функций экстраполяции значений признаков ТС;  $K$  – множество критериев контроля ТС ГТД.

### 3. Условия и ограничения, которые должны быть выполнены в процессе решения задачи разработки методов формирования контрольных и прогностических признаков ТС ГТД и методов контроля и прогнозирования ТС ГТД.

Неустранимым ограничением при разработке требуемых методов и средств является отсутствие возможности специально дополнять базу эмпирических данных недостающей информацией:

3.1. Неосуществимо расширение перечня параметров, характеризующих состояние ГТД, так как внесение дополнительных датчиков в конструкцию ГТД понижает его функциональность, а использовать средства дистанционного измерения при полёте самолёта невозможно. Даже если дополнительные датчики будут

внесены, то реализация большого количества налётов нескольких экземпляров ГТД для сбора дополнительных данных займёт значительное время.

В математической формулировке это означает, что опорное множество  $SuppU$  (3) мультимножества  $U$  (2), то есть множество-перечень параметров, является постоянным:

$$SuppU = \{u_i\}_i^{n_U} = const,$$

где  $u_i$  – регистрируемый в полёте параметр;  $SuppU$  – носитель мультимножества  $U$  (3).

3.2. Нереализуемо увеличение количества экспериментов для описания конкретного режима работы двигателя или его работы в определённых условиях. Эксперимент в данном случае сводится к наблюдению без возможности воздействия на объект, поскольку при полёте ЛА (то есть в процессе регистрации параметров, составляющих базу данных) пилот выполняет определённую лётную задачу и не нацелен на сбор недостающей информации.

В математической формулировке это означает следующее.

Если обозначить желаемый набор эмпирических данных, то есть исходную информацию для решения задачи, символом  $\mathcal{K}_3^*$ , то вероятность того, что  $\mathcal{K}_3 = \mathcal{K}_3^*$ , не будет равна единице:

$$\mathcal{P}(\mathcal{K}_3 = \mathcal{K}_3^*) \neq 1.$$

Таким образом, условия и ограничения, которые должны быть выполнены в процессе решения задачи, имеют вид:

$$\begin{aligned} \mathcal{K}_{\text{усл}} &= [SuppU = const, \\ \mathcal{P}(\mathcal{K}_3 = \mathcal{K}_3^*) &\neq 1]. \end{aligned} \quad (7)$$

Используя (4), (6), (7), запишем задачу с трёхкомпонентной системой (1) в виде

$$\begin{aligned} \mathcal{K} &= [\mathcal{K}_3, \mathcal{K}_{\text{тр}}, \mathcal{K}_{\text{усл}}] = \\ &= \left\{ \left\{ [U, s_k]^{i,j} \right\}_{j=1}^{N_i} \right\}_{i=1}^{n_W}, [M_{SuppU}^{SuppV}, F_V^B, f, K], \\ &[SuppU = const, \\ &\mathcal{P}(\mathcal{K}_3 = \mathcal{K}_3^*) \neq 1]. \end{aligned}$$

Здесь  $U$  в паре  $[U, s_k]^{i,j}$  – мультимножество зарегистрированных значений параметров за  $j$ -й полёт  $i$ -го образца ГТД;  $s_k$  в паре  $[U, s_k]^{i,j}$  – техническое состояние ГТД на начало  $j$ -го полёта  $i$ -го образца ГТД;  $N_i$  – количество полётов  $i$ -го образца ГТД;  $n_W$  – количество образцов ГТД;  $M_{SuppU}^{SuppV}$  – модель выделения контрольных и прогностических параметров из множества регистрируемых;  $F_V^B$  – функция вычисления множества значений контрольных и прогностических признаков на основании множества зарегистрированных значений параметров;  $f$  – множество функций экстраполяции значений признаков ТС;  $K$  – множество критериев контроля ТС ГТД;  $SuppU$  – множество-перечень регистрируемых параметров;  $\mathcal{K}_3$  – исходные данные для решения задачи;  $\mathcal{K}_3^*$  – желаемый набор исходных данных для решения задачи;  $\mathcal{P}(\mathcal{K}_3 = \mathcal{K}_3^*)$  – вероятность равенства  $\mathcal{K}_3 = \mathcal{K}_3^*$ .

Таким образом, представлена формальная постановка задачи контроля и прогнозирования ТС ГТД, в результате решения которой будут получены модели определения контрольных и прогностических параметров, вычисления контрольных и прогностических признаков и установления ТС двигателя в интересующий момент времени.

### Библиографический список

1. Елисеев Ю.С., Крымов В.В., Малиновский К.А., Попов В.Г. Технология эксплуатации, диагностики и ремонта газотурбинных двигателей. М.: Высшая школа, 2002. 355 с.
2. Кеба И.В. Диагностика авиационных газотурбинных двигателей. М.: Транспорт, 1980. 248 с.
3. Киселёв Ю.В., Епишев Н.И. Диагностика газотурбинных двигателей и их узлов по термогазодинамическим и виброакустическим параметрам. Самара: СГАУ, 2007. 188 с.
4. Богуслаев А.В., Дубровин В.И., Субботин С.А. Методы неитеративного синтеза многослойных нейронных сетей в задачах диагностики авиадвигателей // Вестник двигателестроения. 2004. № 1. С. 86-93.
5. Васильев В.И., Жернаков С.В. Идентификация характеристик ГТД на основе технологии нейронных сетей // Контроль. Диагностика. 2009. № 2. С. 54-61.
6. Жернаков С.В. Диагностика параметров авиационного ГТД на основе нейронных сетей // Авиакосмическое приборостроение. 2003. № 12. С. 50-60.
7. Кулагин В.В. Теория, расчёт и проектирование авиационных двигателей и энергетических установок. Основы теории ГТД. Рабочий процесс и термогазодинамический анализ. М.: Машиностроение, 2003. 327 с.

### Информация об авторе

**Зотин Никита Александрович**, аспирант кафедры эксплуатации авиационной техники, Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королёва (национальный ис-

следовательский университет). E-mail: [NikitaEAT@yandex.ru](mailto:NikitaEAT@yandex.ru). Область научных интересов: диагностика технических систем.

## CHECK AND PREDICTION OF GAS-TURBINE ENGINE'S TECHNICAL STATE

© 2014 N. A. Zotin

Samara State Aerospace University, Samara, Russian Federation

The problem of check and prediction of a gas-turbine engine's technical state is presented in verbal and mathematical statements in the paper. The mathematical statement of the problem is presented as a ternary system. This system consists of three components: initial data for solving the problem; a set of conditions and restrictions to be accomplished in the process of solving the problem; the required result to be obtained by solving the problem. The initial data for solving the problem consist of a set of propulsion unit parameters and environment parameters registered at different time moments as well as sets of expert reports on the technical state of gas-turbine engines. Among the limitations imposed when solving the problem we can name a fixed list of the registered parameters of the power plant as well as the absence of the possibility of purposefully extending the base of empirical data. The required result to be obtained by solving the problem includes: a model for determining check, diagnostic and prognostic parameters; the function of calculating the criteria of the technical state; the function of extrapolating the above-mentioned criteria; a set of control, diagnostic and prognostic criteria.

Each component is described in the paper using the semantics of sets and multisets.

*Control, prediction, gas-turbine engine, problem statement, check and prediction parameters, check and prediction criteria, multiset.*

### References

1. Eliseev U.S., Krimov V.V., Malinowskiy K.A., Popov V.G. Tekhnologiya ekspluatatsii, diagnostiki i remonta gazoturbinykh dvigateley [Maintenance, diagnostics and repair of gas-turbine engines]. Moscow: Vysshaya shkola Publ., 2002. 355 p.
2. Keba I.V. Diagnostika aviacionnykh gazoturbinykh dvigateley [Diagnostics of aviation gas-turbine engines. Moscow: Transport Publ., 1980. 248 p.
3. Kiselev U.V., Epishev N.I. Diagnostika gazoturbinykh dvigateley i ikh uzlov po termogazodinamicheskim i vibroakkusticheskim parametram [Diagnostics of gas-turbine engines and their units on the basis of their thermogasdynamic and vibroacoustic parameters]. Samara: Samara State Aerospace University Pub., 2007. 188 p.
4. Boguslayev A.V., Dubrovin V.I., Subbotin S.A. Methods of non-iterative synthesis of multilayer neural networks in tasks of aviation engine diagnostics // Vestnik dvigatelestroeniya. 2004. No. 1. P. 86-93. (In Ukr.)
5. Vasiliev V.I., Zhernakov S.V. Identification of aviation engine parameters on the basis of neural networks // Testing. Diagnostics. 2009. No. 2. P. 54-61. (In Russ.)
6. Zhernakov S.V. Diagnostics of aviation engine parameters on the basis of neural networks // Aerospace instrument-making. 2003. No. 12. P. 50-60. (In Russ.)
7. Kulagin V.V. Teoriya, raschet i proectirovanie aviacionnykh dvigateley i energeticheskikh ustanovok [Theory, calculation and design of aviation engines and power plants]. Moscow: Mechanical Publ., 2003. 327 p.

### About the author

**Zotin Nikita Alexandrovich**, post-graduate student, Aircraft Maintenance Department, Samara State Aerospace University,

Samara, Russian Federation. E-mail: [NikitaEAT@yandex.ru](mailto:NikitaEAT@yandex.ru). Area of research: diagnostics of engineering systems.