

УДК 681.518.5: 519.816: 629.7.036.3

**Е. М. Угрюмова\***

**А. А. Трончук\***

**А. В. Меняйлов**, канд. техн. наук\*\*

**В. Е. Афанасьевская\***

\* Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского  
«Харьковский авиационный институт»

\*\* ОАО «Мотор Сич» (г. Запорожье)

## **ПРИМЕНЕНИЕ ЭВОЛЮЦИОННЫХ МЕТОДОВ ДЛЯ ОЦЕНКИ ПАРАМЕТРОВ УЗЛОВ ГАЗОТУРБИННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ НА ОСНОВЕ ДАННЫХ ИЗМЕРЕНИЙ В ПРОЦЕССЕ ЭКСПЛУАТАЦИИ**

*Предложена условно-корректная постановка задачи оценки величин расчетных параметров функциональных элементов в процессе эксплуатации газотурбинных двигателей с множественными отказами на основе данных измерений симптомов. Синтез квази-решения поставленной задачи осуществлялся путем регуляризации поиска экстремума сглаживающего функционала с использованием метода А. Н. Тихонова – для обеспечения единственности и устойчивости решения относительно малых вариаций входных данных, выбор параметра регуляризации – в соответствии с обобщенным принципом невязки. Разработан эволюционный метод решения поставленной задачи, основанный на использовании генетического алгоритма. Рассмотрены примеры реализации предлагаемого метода при решении задачи диагностирования современного турбореактивного двигателя для пассажирского регионального самолета.*

*Запропоновано умовно-коректну постановку завдання оцінки величин розрахункових параметрів функціональних елементів у процесі експлуатації газотурбінних двигунів із множинними відмовами на основі даних вимірів симптомів. Синтез квазірозв'язку поставленого завдання здійснювався шляхом регуляризації пошуку екстремуму функціонала, що згладжує, з використанням методу А. М. Тихонова – для забезпечення одиначності й стійкості розв'язку щодо малих варіацій вхідних даних, вибір параметра регуляризації – відповідно до узагальненого принципу невязання. Розроблений еволюційний метод розв'язання поставленої задачі, що ґрунтується на використанні генетичного алгоритму. Розглянуто приклади реалізації запропонованого методу при розв'язанні завдання діагностування для сучасного турбореактивного двигуна сучасного пасажирського регіонального літака.*

### **Введение**

В последнее время все большее внимание уделяется проблеме совершенствования методов и автоматизированных систем контроля и диагностики (АСКД) по параметрам рабочего процесса с последующим прогнозированием технического состояния (ТС) газотурбинных двигателей (ГТД). Решение ее и последующая эффективность эксплуатации АСКД в реальных условиях в значительной мере зависит от степени достоверности диагностической информации.

Эффективность реализации процесса диагностирования с использованием АСКД главным образом зависит от качества решения следующих задач: разработка и построение математической модели рабочего процесса ГТД, диагностической модели, выбор диагностических признаков и диагностического режима, количества априорных термодинамических параметров рабочего процесса. Наибольшую ценность представляет результат идентификации ТС двигателя с глубиной диагностирования до узла.

Однако следует учитывать важное обстоятельство, что большинство современных ГТД и их подсистем имеют низкий уровень диагностирования. Поэтому качество анализа информации о ТС и, как следствие, эффективность существующих АСКД ТС остается на низком уровне. Это приводит к несвоевременному выявлению отказов подсистем (функциональных элементов) ГТД, невозможности оперативного принятия обслуживающим персоналом ответных эксплуатационных решений, увеличению количества досрочных прекращений эксплуатации сложных дорогостоящих объектов авиационной техники и снижению уровня безопасности полетов самолетов.

Кроме того, причина досрочного съема двигателя может носить комплексный характер с точки зрения возникновения дефекта или отказа в целом. Отказы могут быть вызваны как отказами отдельных функциональных элементов, так и перемежающимися отказами – множественными отказами. Последнее обстоятельство приводит к неопределенности в задании допусков на каждый симптом для разных сценариев отказа системы в целом, вызванных множеством отказов.

Анализ существующих подходов и методов решения задач технической диагностики ГТД с множественными отказами показывает, что число их ограничено. В работе [1] предложен метод адаптации расчетных параметров функциональных элементов, в котором сложное нелинейное моделирование термогазодинамических характеристик двигателя и генетический алгоритм объединены для получения высококачественной модели характеристик двигателя. Однако в работе [1] отсутствует анализ корректности постановки задачи. Метод согласования состояния двигателя, обеспечивающий точную оценку текущих параметров и неопределенности прогнозируемых характеристик с учетом известных недостатков моделей ГТД и внешних помех, описан Брайсом Росом [2]. В данном методе применяется стохастическая фильтрация на основе линейной модели, что ограничивает его применение.

Актуальными являются задачи нахождения интервалов значений симптомов, соответствующих исправному техническому состоянию, а также оценки величин расчетных параметров функциональных элементов в процессе эксплуатации на основе данных измерений симптомов, они относятся к классу некорректных задач.

В данной работе предложена условно-корректная постановка задачи диагностирования ГТД с множественными отказами – оценки величин расчетных параметров функциональных элементов в процессе эксплуатации на основе данных измерений симптомов путем сведения этой задачи к так называемой задаче модификации [3]. Синтез квазирешения задачи модификации осуществлялся путем регуляризации поиска экстремума сглаживающего функционала с использованием метода А.Н.Тихонова – для обеспечения единственности и устойчивости решения относительно малых вариаций входных данных. Выбор параметра регуляризации осуществлялся в соответствии с обобщенным принципом невязки. Предложен эволюционный метод решения задачи модификации, основанный на использовании ГА. Применение предлагаемого подхода, а также процедуры адаптации при выборе параметров ГА обеспечивает значительное снижение информационной сложности алгоритма поиска рационального решения. Рассмотрены примеры реализации предлагаемого метода при решении задачи диагностирования для современного турбореактивного двигателя пассажирского регионального самолета.

### Постановка задачи исследования

Газотурбинный двигатель, являющийся объектом диагностирования (ОД), рассматривается как сложная техническая система, состоящая из взаимодействующих подсистем и функциональных элементов. В каждом из них в процессе эксплуатации могут возникать дефекты, приводящие к отказам функциональных элементов, а затем и системы в целом.

Формализуем представление объекта диагностирования. Для удобства введем приведение всех данных к безразмерному виду

$$f^{\circ} = \frac{2(F - \langle F \rangle)}{F_{\max} - F_{\min}}, \quad f^* = \frac{2(F^* - \langle F \rangle)}{F_{\max} - F_{\min}}, \quad \delta_{f_0} = f^{\circ} - f_0^{\circ}, \quad \delta_f^* = f^{\circ} - f^*,$$

где  $F, F_{\min}, F_{\max}, F^*$  – текущее, минимальное, максимальное и эталонное значения рассматриваемого параметра (переменной);  $F_0$  – значение параметра (переменной), соответствующее прототипу;

$$\langle F \rangle = \frac{F_{\max} + F_{\min}}{2}, \quad (F_0, F^*) \in [F_{\min}, F_{\max}], \quad (f^\circ, f^*, \delta_{f_0}, \delta_f^*) \in [-1, 1].$$

Для удобства представления результатов работы введем оценки текущих, рациональных и желаемых параметров (переменных)

$$\Delta f^\circ = \frac{F - F_0}{F_0} \cdot 10^2, \quad \Delta \hat{f}^\circ = \frac{\hat{F} - F_0}{F_0} \cdot 10^2, \quad \Delta f^* = \frac{F^* - F_0}{F_0} \cdot 10^2,$$

а также верхней и нижней границ  $F$ , соответствующих работоспособному состоянию

$$\Delta f^{+,-} = \frac{F^{+,-} - F_0}{F_0} \cdot 10^2.$$

Пусть техническое состояние объекта диагностирования определяется множеством критериев  $W^\circ = \{w_i^\circ\}$ ,  $i = 1, 2, \dots, I$ ;  $w_i^*$  – эталонное значение  $i$ -го критерия, характеризующего техническое состояние объекта диагностирования;  $\delta_{wi} = w_i^\circ(q^\circ) - w_i^*$  – фактическое отклонение текущего значения этого критерия от эталонного,  $q^\circ = (\Pi^\circ, U^\circ, \Phi^\circ)$ ;  $\Pi^\circ$  – вектор проектных и режимных параметров,  $U^\circ$  – вектор управляющих или регулирующих переменных,  $\Phi^\circ$  – вектор фазовых переменных;  $q^\circ \in Q$  – конечное множество параметров и переменных, определяющих техническое состояние объекта диагностирования;  $\varepsilon_{wi}^{+,-}$  – верхнее и нижнее значения допустимых отклонений  $\delta_{wi}$ . Тогда если  $\forall i = 1 \dots I : (\delta_{wi} \leq \varepsilon_{wi}^+) \wedge (\delta_{wi} \geq \varepsilon_{wi}^-) = \text{true}$ , то можно утверждать, что объект диагностирования находится в нормальном (исправном, работоспособном) состоянии. Если же справедливо логическое выражение

$$\forall i = 1 \dots I : (\delta_{wi} > \varepsilon_{wi}^+) \vee (\delta_{wi} < \varepsilon_{wi}^-) = \text{true},$$

то наблюдается аномальное состояние – возникли отказы подсистем, функциональных элементов.

Отказы могут возникать как «элементарный отказ» – отказ работы единичного функционального элемента и как «множественный отказ» – комбинация элементарных отказов. Следовательно, необходимо иметь в виду, что возможно существование подмножества значений  $\{q_k^\circ\}$ ,  $q_k^\circ \subset q^\circ$ ,  $k = 1, 2, \dots, K$ , приводящих к возникновению отказа системы в целом, где  $K$  – число возможных сценариев.

Будем понимать под дефектом ( $f_j, j = 1, 2, \dots, J_k$ ) функционального элемента повреждение, которое характеризуется отклонением текущего значения вектора  $q_j^\circ$  от эталонного значения  $q_j^*$ . Следует подчеркнуть, что каждому дефекту  $f_j, j = 1, 2, \dots, J_k$  как диагностическому признаку можно поставить в соответствие один или, в общем случае, подмножество параметров  $\{P_{jt}\}$ ,  $P_{jt} \in P_j^\circ$ ,  $t = 1, 2, \dots, T_j$ , его характеризующих, где  $P^\circ = (\Pi^\circ, U^\circ)$ . Пусть  $\delta_{qj} = q_j^\circ - q_j^*$  – фактическое отклонение текущего значения  $q_j^\circ$  от эталонного значения  $q_j^*$ ,  $\varepsilon_{qj}^{+,-}$  – верхнее и нижнее значения допустимых отклонений  $\delta_{qj}$ . Тогда, если справедливо логическое выражение:  $\forall j = 1 \dots J_k : (\delta_{qj} > \varepsilon_{qj}^+) \vee (\delta_{qj} < \varepsilon_{qj}^-) = \text{true}$  – говорят, что наблюдается отказ  $j$ -го функционального элемента сложной технической системы.

В случае множественных отказов диагностическая гипотеза, представленная ранее для элементарного отказа, для  $k$ -го сценария примет вид

$$\bigwedge_{j \in [1 \dots J_k]} ((\delta_{qj} > \varepsilon_{qj}^+) \vee (\delta_{qj} < \varepsilon_{qj}^-)) = \text{true}. \quad (1)$$

Будем предполагать, что объект диагностирования оснащен АСКД, с помощью которой возможен мониторинг технического состояния путем измерения и регистрации фазовых переменных (симптомов)  $S^\circ \subset \Phi^\circ$ . Если учесть, что  $S^\circ \subset \Phi^\circ \subset q^\circ$ , то предикат (1), отражающий возникновение отказа объекта диагностирования в целом по  $k$ -му сценарию, можно переписать в виде

$$\bigwedge_{l \in [1 \dots L_k]} ((\delta_{sl} > \varepsilon_{sl}^+) \vee (\delta_{sl} < \varepsilon_{sl}^-)) = \text{true},$$

где  $\delta_{sl} = S_k^\circ - S_k^*$ ,  $S_k^\circ = \{s_{kl}^\circ\}$ ,  $S_k^\circ \subseteq S^\circ$ ;  $l = 1, 2, \dots, L_k$ ;  $L_k$  – число симптомов, фактическое отклонение текущих значений  $s_{kl}^\circ$  которых выходят за пределы  $[\varepsilon_{sl}^-, \varepsilon_{sl}^+]$  для каждого  $k$ -го сценария.

Будем считать, что вектор  $W^\circ$  может быть найден расчетным путем на базе исходной математической модели (ИММ) объекта диагностирования [4]

$$W^\circ = W(\Pi^\circ, U^\circ, \Phi^\circ), \Phi^\circ = \Phi(P^\circ), \quad (2)$$

где  $P^\circ = (\Pi^\circ, U^\circ)$ . Следует отметить, что в результате декомпозиции ИММ можно выявить подмножество частных математических моделей (ЧММ) вида  $s_l^\circ = \phi(P_l^\circ)$ ;  $l = 1, 2, \dots, L_k$ , где  $L_k$  – число симптомов для  $k$ -го сценария;  $P_l^\circ = \{P_{lj}^\circ\}$ ,  $j = 1, 2, \dots, J_l$ ,  $J_l$  – число параметров в  $l$ -й ЧММ. Поэтому если в  $k$ -м сценарии отказа системы в целом мы наблюдаем подмножество  $S_k^\circ = \{s_{kl}^\circ\}$ ,  $S_k^\circ \subseteq S^\circ$ ;  $l = 1, 2, \dots, L_k$ , где  $L_k$  – число симптомов, фактическое отклонение текущих значений которых выходят за пределы  $[\varepsilon_{sl}^-, \varepsilon_{sl}^+]$ , то отказ системы в целом может быть вызван лишь подмножеством параметров  $\{P_j^\circ\}$ ,  $j = 1, 2, \dots, J_k$ , где  $J_k \leq \sum_{l=1}^{L_k} J_l$ .

С помощью (2) для каждого сценария может быть решена прямая задача интервального анализа

$$\{(\varepsilon_p^-, \varepsilon_p^+)_j\} \rightarrow \{(\varepsilon_s^-, \varepsilon_s^+)_i\} \rightarrow \{(\varepsilon_w^-, \varepsilon_w^+)_i\}, \quad j = 1 \dots J_k, l = 1 \dots L_k, i = 1 \dots I, k = 1 \dots K.$$

Переход объекта диагностирования в аномальное состояние требует решения задачи диагностирования, которая формулируется следующим образом: исходя из текущих данных измерений симптомов  $S^\circ$ , определить подсистемы (функциональные элементы), в которых произошли отказы. Обобщенный алгоритм решения задачи диагностирования в результате ее декомпозиции может быть представлен как последовательность решения взаимосвязанных задач:

- обратная задача интервального анализа для каждого сценария – нахождения интервалов значений симптомов, соответствующих исправному техническому состоянию объекта диагностирования с множественными отказами

$$\{(\varepsilon_w^-, \varepsilon_w^+)_i\} \rightarrow \{(\varepsilon_p^-, \varepsilon_p^+)_j\} \rightarrow \{(\varepsilon_s^-, \varepsilon_s^+)_i\}.$$

На основе полученных результатов формируется база данных допусков на параметры и переменные, соответствующие исправному техническому состоянию системы в целом;

- измерение симптомов  $S^\circ$ , определение подмножества симптомов  $S_a^\circ = \{s_{al}^\circ\}$ ,  $l = 1, 2, \dots, L_a$ ,  $S_a^\circ \subseteq S^\circ$ , где  $L_a$  – количество измеряемых переменных, для которых  $\delta_{sl} \neq 0$ ; а также перечня параметров  $\{P_j^\circ\}$ ,  $j = 1, 2, \dots, J_a$ , соответствующих наблюдаемым симптомам  $S_a^\circ$ ;
- оценка величин расчетных параметров функциональных элементов в процессе эксплуатации на основе данных измерений симптомов  $S_a^\circ$

$$\{\delta_{sl}\} \rightarrow \{(\delta_p)_j\}, \quad j = 1 \dots J_a; \quad (3)$$

- распознавание образов – определения функциональных элементов, отказ которых привел к отказу системы в целом;
- составление графика работ для обслуживающего персонала по обнаружению отказавших функциональных элементов.

Рассмотрим подробнее задачу оценки величин расчетных параметров функциональных элементов в процессе эксплуатации на основе данных измерений симптомов  $S^\circ$  (3). Исходными данными для нее является подмножество симптомов  $S_a^\circ = \{s_{al}^\circ\}$ ,  $l = 1, 2, \dots, L_a$ ,  $S_a^\circ \subseteq S^\circ$ , где  $L_a$  – количество измеряемых переменных, для которых  $\delta_{sl} \neq 0$ , а также перечень параметров  $\{P_j\}$ ,  $j = 1, 2, \dots, J_a$ , соответствующих наблюдаемым симптомам  $S_a^\circ$ . Необходимо определить множество  $\{(\delta_p)_j\}$  фактических отклонений текущих значений параметров и переменных  $P_j$ ,  $j = 1, 2, \dots, J_a$  от эталонных значений  $P_j^*$ .

Определим компоненты вектора допустимых отклонений значений  $s_{al}$  от эталонных значений  $\varepsilon_{sl} = \frac{2(s_{al} - s_l^*)}{(s_l)_{\max} - (s_l)_{\min}}$ , а также значения оценок  $s_{al}$ :  $\Delta s_{al} = \frac{s_{al} - s_{al}^*}{s_{al}^*}$ , где  $s_l^* = s_{l,0}$ .

Введем отображение  $G: \{s_{al}^\circ\} \rightarrow \hat{w}^\circ$ , определяющее обобщенную функцию выбора

$$\hat{w}^\circ(P^\circ, \beta) = \sum_{l=1}^{L_a} (\delta_{sl} - \varepsilon_{sl})^2 + \beta \sum_{j=1}^{J_a} (\delta_{pj})^2, \quad (4)$$

где  $G$  – система предпочтений лица, принимающего решения (модель принятия решений), параметр регуляризации,  $\delta_{pj} = P_j - P_j^*$ ,  $P_j^* = P_{j,0}$ .

Отметим, что размерность поставленной задачи может быть существенно уменьшена, если на основе решения задачи распознавания образов будет заранее определен вид сценария отказа системы в целом, который достоверно соответствует наблюдаемым симптомам. Результатом решения такой задачи будет перечень  $S_k^\circ = \{s_{kl}^\circ\}$ ,  $l \in [1, L_k]$ ,  $S_k^\circ \subseteq S^\circ$ , где  $L_k$  – число симптомов, фактическое отклонение текущих значений которых  $s_{kl}^\circ$  выходят за пределы  $[\varepsilon_{sl}^-, \varepsilon_{sl}^+]$  для этого сценария, а также перечень параметров  $\{P_j\}$ ,  $j = 1, 2, \dots, J_k$ , соответствующих наблюдаемым симптомам  $S_k^\circ$ . В этом случае в формуле (4) можно будет выполнить замену пределов суммирования  $L_a \rightarrow L_k, J_a \rightarrow J_k$ .

Задача (3) относится к классу существенно некорректных задач. Квазирешение поставленной задачи (нормальное решение) может быть найдено методом регуляризации А. Н. Тихонова

$$\hat{P}_m^\circ = \arg \min_{P^\circ \in \pi} \hat{w}^\circ(P^\circ, \beta_m), \quad \pi = \{P^\circ \in R^n : P^\circ \in [-1, 1]\}. \quad (5)$$

Параметр  $\beta_m$  выбирался в соответствии с обобщенным принципом невязки

$$|\delta_{sl} - \varepsilon_{sl}| < \xi_l + h \|\delta_p\|, \quad l = 1, 2, \dots, L_a,$$

где  $\xi_l$  – погрешность определения  $\varepsilon_{sl}$ ;  $h$  – погрешность определения  $\hat{w}^\circ$ .

### Эволюционный метод решения задачи диагностирования ГТД с множественными отказами

Поиск решения задачи (5) осуществлялся с помощью разработанного авторами эволюционного метода.

В качестве контрольных переменных и настроек генетического алгоритма (ГА) при расчетах использовались следующие параметры: размер популяции 20, схема отбора родительских особей – рулетка в совокупности с элитарным отбором; тип кроссовера – стандарт-

ный односточный, вероятность кроссовера 0,9; тип мутации – гауссовский, вероятность мутации 0,01; максимальное количество итераций 250.

Для предохранения популяции от доминирования неоптимальной хромосомы и тем самым для предотвращения преждевременной сходимости ГА использовалось масштабирование функции приспособленности

$$\text{Fitness} = 1 - \exp(-C \cdot \hat{w}^{\circ}), \quad C > 1.$$

Для повышения точности нахождения экстремума была разработана процедура адаптации. Суть этой процедуры заключается в следующем: последовательно производится запуск ГА с уменьшающейся областью определения управляющих переменных и увеличивающейся точностью до тех пор, пока не будет выполнено условие остановки. Процедура адаптации позволяет снизить информационную сложность алгоритма.

### Результаты численного решения поставленной задачи

В качестве примера реализации предложенного подхода рассмотрим решение задачи оценки величин расчетных параметров функциональных элементов в процессе эксплуатации на основе данных измерений симптомов для трехвального турбореактивного двигателя (ТРДД) типа Д-36.

Возможные дефекты и соответствующие им параметры в исходной математической модели для ТРДД типа Д-36 представлены в табл. 1.

**Таблица 1. Соответствие дефектов и параметров математической модели ТРДД**

Признаки дефектов $f_i$	Описание дефекта	Параметры дефектов $P_i$
$f_1$	Помпаж двигателя	$\pi_I$
$f_2$	Обледенение входного устройства двигателя	$\sigma_{вх}$
$f_3$	Дефект проточной части вентилятора	$\eta_{в}$
$f_4$	Дефект проточной части компрессора среднего давления	$\eta_{КСД}$
$f_5$	Дефект проточной части компрессора высокого давления	$\eta_{КВД}$
$f_6$	Дефект в работе клапанов или лент перепуска воздуха компрессора среднего давления	$\Delta G_{КСД}$
$f_7$	Дефект в работе клапанов или лент перепуска воздуха компрессора высокого давления	$\Delta G_{КВД}$
$f_8$	Наличие воды в топливе	$H_u$
$f_9$	Засорение или обгорание топливных форсунок	$\eta_f$
$f_{10}$	Дефект жаровой трубы и корпуса камеры сгорания	$\sigma_{КС}$
$f_{11}$	Обгорание деталей проточной части турбины высокого давления	$\eta_{ТВД}$
$f_{12}$	Обгорание деталей проточной части турбины среднего давления	$\eta_{ТСД}$
$f_{13}$	Обгорание деталей проточной части турбины вентилятора	$\eta_{ТВ}$
$f_{14}$	Разрушение выходного устройства	$\varphi_{СИ}, \varphi_{СИ}$

Объект диагностирования оснащен АСКД, с помощью которой осуществляется регистрация ряда переменных (см. табл. 2). Следует подчеркнуть, что ТРДД типа Д-36 следует отнести к системам с низким уровнем эксплуатационной технологичности и контролепригодности.

В качестве исходной математической модели в данной работе использовалась термодинамическая модель ТРДД [4], предназначенная для решения задач проектирования. Коэффициенты влияния параметров исходной математической модели при отклонении каждого из них  $\Delta P_j^{\circ} = -1$  на значения симптомов  $\Delta s_i^{\circ}$  для ТРДД типа Д-36 при  $m = \text{const}$ ,

$\pi_{ВН} = \text{const}$ ,  $\pi_1 = \text{const}$ ,  $T_{Г} = \text{const}$  представлены в табл. 3 (отклонения  $P_2, P_{10} - P_{14}$  не влияют на  $\Delta s_i^\circ$ ).

Таблица 2. Регистрируемые переменные

Симптом $s_i$	Переменная	Символьное обозначение
$s_1$	Частота вращения вентилятора	$\eta_{В}$
$s_2$	Частота вращения компрессора среднего давления	$\eta_{КСД}$
$s_3$	Частота вращения компрессора высокого давления	$\eta_{КВД}$
$s_4$	Давление воздуха за компрессором высокого давления	$P_{КВД}$
$s_5$	Расход топлива	$G_{Т}$
$s_6$	Температура газа за турбиной среднего давления	$T_{НС}$

Таблица 3. Коэффициенты влияния параметров математической модели

$P_i$	$P_1$	$P_3$	$P_4$	$P_5$	$P_6$	$P_7$	$P_8$	$P_9$
$\Delta s_5^\circ$	0,314	-0,065	-0,349	-0,393	0,008	0,045	1,010	1,010
$\Delta s_6^\circ$	0,180	-0,019	-0,201	-0,219	0,002	0,015	0,009	0,009

Анализ результатов обработки статистических данных по выявлению отказов функциональных элементов ТРДД типа Д-36 показал, что на долю множественных отказов приходится около 11,46% от их общего количества [5]. В данной работе для анализа было отобрано два характерных сценария, когда отказ ТРДД в целом был обусловлен именно множественными отказами функциональных элементов:

- вентилятора, компрессора среднего давления, компрессора высокого давления (сценарий 1);
- компрессора высокого давления, камеры сгорания, турбины высокого давления (сценарий 2).

На основе решения задачи интервального анализа для этих сценариев были определены интервалы значений симптомов, соответствующих исправному техническому состоянию рассматриваемого объекта диагностирования с множественными отказами:

- для сценария 1:  $\{\Delta C_{уд}^\circ \in [0,2], \Delta R_{уд}^\circ \in [-3,0]\} \rightarrow \{\Delta \hat{G}_T^\circ \in [-0,52;0], \Delta \hat{T}_{ТСД}^\circ \in [-0,19;0]\}$ ;
- для сценария 2:  $\{\Delta C_{уд}^\circ \in [0,2], \Delta R_{уд}^\circ \in [-3,0]\} \rightarrow \{\Delta \hat{G}_T^\circ \in [-0,10;0], \Delta \hat{T}_{ТСД}^\circ \in [-0,01;0]\}$ .

Предположим, что в процессе мониторинга технического состояния выбранного экземпляра объекта исследования зафиксированы следующие значения симптомов:  $\Delta G_T^\circ = -0.28$ ,  $\Delta T_{ТСД}^\circ = -0.1$ . Следует отметить, что наблюдаемые значения не принадлежат интервалу значений симптомов, соответствующих исправному техническому состоянию рассматриваемого объекта диагностирования, согласно сценарию 2.

Результаты расчетов параметров и соответствующих им оценок достигнутых критериев качества для двух сценариев отказа при  $\Delta G_T^\circ = -0,28$ ;  $\Delta T_{ТСД}^\circ = -0,1$  ( $m = \text{const}$ ,  $\pi_{ВН} = \text{const}$ ,  $\pi_1 = \text{const}$ ,  $T_{Г} = \text{const}$ ) для  $\beta = 0,001$  представлены в табл. 4. При выборе управляющих переменных для сценария 2 учитывалось, что  $\Delta \sigma_{КС}^\circ$ ,  $\Delta \eta_{ТВД}^\circ$  не влияют на  $\Delta G_T^\circ$ ,  $\Delta T_{ТСД}^\circ$ .

Таким образом, решена задача оценки величин расчетных параметров функциональных элементов в процессе эксплуатации на основе данных измерений симптомов. На основе анализа результатов вычислений можно сделать следующие выводы:

Таблица 4. Результаты расчетов параметров и соответствующих им оценок критериев качества

Сценарий	$\Delta\hat{\eta}_B^\circ$	$\Delta\hat{\eta}_{КСД}^\circ$	$\Delta\hat{\eta}_{КВД}^\circ$	$\Delta\hat{\sigma}_{КС}^\circ$	$\Delta\hat{\eta}_{ТВД}^\circ$	$\Delta\hat{C}_{уд}^\circ$	$\Delta\hat{R}_{уд}^\circ$
1	-0,93	-0,11	-0,24	–	–	0,72	-0,81
2	–	–	-0,47	–	–	0,29	-0,43

- полученные значения величин расчетных параметров функциональных элементов, например  $\Delta\hat{\eta}_{КВД}^\circ$ , для различных сценариев отказа ТРДД в целом отличаются;
- при решении задачи оценки величин расчетных параметров функциональных элементов в процессе эксплуатации на основе данных измерений симптомов необходима дополнительная информация о вероятности реализации каждого из возможных сценариев отказа системы в целом;
- для сценария 2 нельзя определить состояние элементов камеры сгорания и турбины высокого давления в данном случае, так как при  $m = \text{const}$ ,  $\pi_{ВН} = \text{const}$ ,  $\pi_I = \text{const}$ ,  $T_I = \text{const}$  –  $\Delta G_T^\circ$ ,  $\Delta T_{ТСД}^\circ$  не зависят от  $\Delta\sigma_{КС}^\circ$ ,  $\Delta\eta_{ТВД}^\circ$  (см.табл.4);
- для сценария 2 в рассматриваемом случае при регистрируемых значениях симптомов нельзя сделать заключение о техническом состоянии ТРДД в целом. Наблюдаемые значения симптомов находятся вне допустимых диапазонов, в то время как критерии качества, характеризующие состояние объекта диагностирования – удельный расход топлива  $C_{уд}$  и удельная тяга  $R_{уд}$  – принадлежат соответственно выбранным;
- в задачах диагностирования технического состояния ТРДД при выборе симптомов необходимо дополнительно располагать информацией о наличии влияния дефектов на симптомы, а также о вероятности реализации каждого из возможных сценариев отказа системы в целом.

### Заключение

Рассмотрены условно-корректная постановка и вычисленный метод определения величин расчетных параметров функциональных элементов ТРДД в процессе эксплуатации на основе данных измерений симптомов.

Получены оценки величин расчетных параметров для нескольких характерных сценариев, когда отказ ТРДД в целом был обусловлен множественными отказами функциональных элементов. Показано, что при выборе симптомов, а также при определении величин расчетных параметров функциональных элементов в процессе эксплуатации на основе данных измерений симптомов необходимо дополнительно располагать информацией о наличии влияния дефектов на симптомы, а также о вероятности реализации каждого из возможных сценариев отказа системы в целом.

Применение процедуры адаптации при выборе параметров генетического алгоритма в предлагаемом эволюционном методе обеспечивает в среднем снижение на (10–50)% информационной сложности алгоритма поиска рационального решения по сравнению с традиционным генетическим алгоритмом.

### Литература

1. *Li Yi-Guang*. A Genetic Algorithm Approach to Estimate Performance Status of Gas Turbines // Proc. ASME Turbo Expo 2008: Power for Land, Sea and Air (GT2008). – Berlin (Germany). – 2008. –P 9. (GT2008-50175).
2. *Bryce A. Roth*. Probabilistic matching of turbofan engine performance models to test data / A. Roth Bryce, L. Doel David, J. Cissell Jeffrey // Proc. ASME Turbo Expo 2005: Power for Land, Sea and Air (GT2005). – Nevada (USA). – 2005. –P 8. (GT2005-68201)
3. *Угрюмова Е. М.* Совершенствование сложных технических систем методом обратных задач / Е. М. Угрюмова, С. Г. Волков, М. Л. Угрюмов // *Авиац.-косм. техника и технология*. – 2006. – № 1 (27). – С. 91–95.



4. *Теория* воздушно-реактивных двигателей / Под. ред. С. М. Шляхтенко. – М.: Машиностроение, 1975. – 568 с.
5. *Попов А. В.* Исследование динамических характеристик ТРДД с перемежающимися неисправностями проточной части на установившихся режимах его работы // *Авиаци.-косм. техника и технология.* – 2007. – № 2 (38). – С. 63–67.

Поступила в редакцию  
3.06.2009