УДК 681.518.5: 519.816

В.Е. АФАНАСЬЕВСКАЯ, А.А. ТРОНЧУК, Е.М. УГРЮМОВА, М.В. РОЖКОВА

Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Украина

МЕТОД РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ ДИАГНОСТИКИ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ГАЗОТУРБИННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ НА ОСНОВЕ ИЗМЕРЕНИЙ ГАЗОДИНАМИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ В УСЛОВИЯХ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ ВХОДНЫХ ДАННЫХ

Рассмотрены условно-корректные математические постановки и метод решения задач диагностики сложных технических систем с множественными отказами на основе концепции допускового контроля: нахождения интервалов значений симптомов, соответствующих исправному техническому состоянию, а также оценки величин расчетных параметров функциональных элементов в процессе эксплуатации на основе данных измерений симптомов в условиях неопределенности входных данных, путем сведения этих задач к так называемым задачам стохастической модификации. Рассмотрены примеры реализации предложенного метода при решении задач диагностики для современного двухконтурного турбореактивного двигателя (ТРДД) типа Д-36 для пассажирского регионального самолета.

Ключевые слова: *техническая диагностика, допусковый контроль, стохастическая оптимизация, эволюционный метод.*

Введение

В период эксплуатации технических систем возникает необходимость определения их текущего технического состояния и принятия с использованием этой информации конкретных эксплуатационных решений. Поэтому применяемые на практике методы диагностирования должны обеспечивать достаточную глубину обнаружения неисправностей – выявлять не только отказы двигателя в целом, но и определять дефекты с точностью до узла, а также прогнозировать время безаварийной работы.

Традиционный и наиболее распространенный подход к организации диагностирования технических систем основан на непрерывном анализе и регистрации значений измеряемых переменных рабочего процесса [1]. Эти значения (диагностические симптомы) сравнивают с граничными значениями, характеризующими различные возможные состояния объекта. При выполнении условий принадлежности симптомов определенной области формируется диагноз о соответствующем техническом состоянии.

Причина выхода из строя технической системы может носить комплексный характер с точки зрения возникновения дефекта или отказа в целом. Отказы могут быть вызваны как отдельными функциональными элементами (ФЭ), так и перемежающимися (множественными) дефектами. Последнее обстоятельство приводит к неопределенности в задании допусков для каждого симптома для разных сценариев отказов, вызванных множественными дефектами [2]. Задачи нахождения интервалов значений симптомов, соответствующих исправному техническому состоянию, а также оценки величин расчетных параметров ФЭ в процессе эксплуатации на основе данных измерений симптомов, относятся к классу некорректных задач [3].

Для сложных динамических объектов важной и актуальной является научно-прикладная задача повышения эффективности автоматизированного диагностического анализа параметрической информации путем формирования теоретических основ принятия решений в процессе диагностирования с помощью новейших информационных технологий. Это позволит обеспечить оперативную поддержку принятия корректных эксплуатационных решений обслуживающим персоналом в течение всего периода регулярной эксплуатации технической системы.

Возможными путями решения данной научно-прикладной задачи являются:

– структуризация условно-корректных постановок задач диагностирования и разработка регулярных методов их решения;

– повышение качества анализа информации о техническом состоянии путем разработки и внедрения прикладных информационных технологий поддержки принятия решений, реализующих новые методы решения задач диагностирования и способы автоматизации процессов оценки технического состояния системы.

© В.Е. Афанасьевская, А.А. Трончук, Е.М. Угрюмова, М.В. Рожкова

Постановка задачи исследования

Рассмотрим в качестве объекта диагностирования сложную техническую систему (СТС), состоящую из взаимодействующих подсистем и ФЭ. В каждом из них могут возникать в процессе эксплуатации дефекты, приводящие к отказам ФЭ, а затем и системы в целом.

Формализация представления объекта диагностирования приведена в[4].

Пусть техническое состояние объекта диагностирования определяется множеством критериев $W^\circ = \{w_i^\circ\}$, $i = 1...I$. Пусть w_i^* – эталонное значение i-того критерия, характеризующего техническое состояние объекта диагностирования; $\delta_{wi} = w_i^\circ(q^\circ) - w_i^*$ – фактическое отклонение текущего значения этого критерия от эталонного, $q^\circ = (\Pi^\circ, U^\circ, \Phi^\circ)$, Π° – вектор проектных и режимных параметров, U° – вектор управляющих или регулирующих переменных, Φ° – 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 δ_{wi}. Тогда, если $\forall i = 1...I : (\delta_{wi} \le \varepsilon_{wi}^+) \wedge (\delta_{wi} \ge \varepsilon_{wi}^-) = \text{true}$, то можно утверждать, что объект диагностирования находится в нормальном (исправном, работоспособном) состоянии. Если же справедливо логическое выражение

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

то наблюдается аномальное состояние – возникли отказы подсистем, ФЭ.

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

Будем понимать под дефектом $f_j, j = 1...J_k$ ФЭ изменение состояния, которое характеризуется отклонением текущего значения вектора q_j° от эталонного значения q_j^*. Каждому дефекту $f_j, j = 1...J_k$, как диагностическому признаку, можно поставить в соответствие один или, в общем случае, подмножество характеризующих его параметров $\{P_{jt}\}, P_{jt} \in P_j^\circ, t = 1...T_j$, где $P^\circ = (\Pi^\circ, U^\circ)$.

Пусть $\delta_{qj} = q_j^\circ - q_j^*$ – фактическое отклонение текущего значения q_j° от эталонного значения q_j^*, $\varepsilon_{qj}^{+,-}$ – верхнее и нижнее значения допустимых отклонений δ_{qj}. Тогда, если справедливо логическое выражение: $\forall j = 1...J_k : (\delta_{qj} > \varepsilon_{qj}^+) \vee (\delta_{qj} < \varepsilon_{qj}^-) = \text{true}$ – говорят, что наблюдается отказ j-того ФЭ СТС.

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

$$\bigwedge_{j \in [1...J_k]} ((\delta_{qj} > \varepsilon_{qj}^+) \vee (\delta_{qj} < \varepsilon_{qj}^-)) = \text{true}. \quad (2)$$

Будем предполагать, что объект диагностирования оснащен АСКД, с помощью которой возможен мониторинг технического состояния путем измерения и регистрации переменных (симптомов) $S^\circ \subset \Phi^\circ$. Если учесть, что $S^\circ \subset \Phi^\circ \subset q^\circ$, то предикат (2), отражающий возникновение отказа объекта диагностирования в целом по k-тому сценарию, можно переписать в виде:

$$\bigwedge_{l \in [1...L_k]} ((\delta_{sl} > \varepsilon_{sl}^+) \vee (\delta_{sl} < \varepsilon_{sl}^-)) = \text{true}, \quad (3)$$

где

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

Будем считать, что вектор W° может быть найден расчетным путем на базе исходной математической модели (ИММ) объекта диагностирования [5]:

$$W^\circ = W(\Pi^\circ, U^\circ, \Phi^\circ), \Phi^\circ = \Phi(P^\circ), \quad (4)$$

где $P^\circ = (\Pi^\circ, U^\circ)$.

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

$$J_k \le \sum_{l=1}^{L_k} J_l \ .$$

С помощью (4) может быть решена для каждого сценария прямая задача интервального анализа: $\{(\varepsilon_p^-,\varepsilon_p^+)_j\} \to \{(\varepsilon_s^-,\varepsilon_s^+)_l\} \to \{(\varepsilon_w^-,\varepsilon_w^+)_i\}$, $j=1...J_k$, $l=1...L_k$, $i=1...I$, $k=1...K$.

Переход объекта диагностирования в аномальное состояние требует решения задачи диагностирования, которая формулируется следующим образом: исходя из измеренных значений симптомов S°, определить подсистемы (ФЭ), в которых произошли отказы. Обобщенный алгоритм решения задачи диагностирования в результате ее декомпозиции может быть представлен как последовательность решения взаимосвязанных задач:

– обратной задачи интервального анализа для каждого сценария – нахождения интервалов значений симптомов, соответствующих исправному техническому состоянию объекта диагностирования:

$$\{(\varepsilon_w^-,\varepsilon_w^+)_i\} \to \{(\varepsilon_p^-,\varepsilon_p^+)_j\} \to \{(\varepsilon_s^-,\varepsilon_s^+)_l\} . \qquad (5)$$

На основе полученных результатов формируется база данных, содержащая допуски на изменение параметров и симптомов, соответствующие исправному техническому состоянию системы в целом;

– измерение симптомов S°, определение подмножества симптомов $S_a^\circ = \{s_{al}^\circ\}$, $l=1...L_a$, $S_a^\circ \subseteq S^\circ$, где L_a – количество измеряемых переменных, для которых $\delta_{sl} \ne 0$; а также перечня параметров $\{P_{lj}\}, j=1...J_a$, соответствующих наблюдаемым симптомам S_a°;

– оценки величин расчетных параметров ФЭ в процессе эксплуатации на основе наблюдаемых симптомов S_a°:

$$\{\delta_{sl}\} \to \{\delta_{pj}\}, j=1...J_a \ ; \qquad (6)$$

– распознавания образов – определения ФЭ, отказ которых привел к отказу системы в целом.

Рассмотрим подробнее задачу оценки величин расчетных параметров ФЭ в процессе эксплуатации на основе данных измерений симптомов S° (6). Входными данными для нее является подмножество симптомов $S_a^\circ = \{s_{al}^\circ\}$, $l=1...L_a$, $S_a^\circ \subseteq S^\circ$, где L_a – количество измеряемых переменных, для которых $\delta_{sl} \ne 0$, а также перечень параметров $\{P_{lj}\}, j=1...J_a$, соответствующих наблюдаемым симптомам S_a°. Необходимо определить множество $\{(\delta_p)_j\}$ фактических отклонений текущих значений параметров и переменных $P_{lj}, j=1...J_a$ от эталонных значений P_{lj}^*.

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}° выходят за пределы $[\varepsilon_{sl}^-,\varepsilon_{sl}^+]$ для этого сценария, а также перечень параметров $\{P_{lj}\}, j=1...J_k$, соответствующих наблюдаемым симптомам S_k°. В этом случае можно будет выполнить замену пределов изменения переменных суммирования: $L_a \to L_k, J_a \to J_k$.

Постановка задачи стохастической оптимизации со смешанными условиями

Представим задачу стохастической оптимизации в виде $f(x) \to \min$, где f – функция цели (ФЦ), вид которой зависит от условий рассматриваемой задачи, x – случайная величина с заданным законом распределения. В данной работе рассматриваются переменные x с нормальным или равномерным законами распределения. Однозначно определим переменную x, в случае нормального закона распределения, задав ее математическое ожидание $M[x] = x_c$ и дисперсию $D[x] = \sigma_x^2$. Следует отметить, что если рассматривается задача многопараметрической оптимизации, то переменная x и определяющие ее величины x_c и σ_x являются векторами, размерность которых соответствует размерности решаемой задачи.

Вследствие случайной природы переменной x, ФЦ $f(x)$ также будет случайной величиной. Для представления случайной ФЦ определим ее математическое ожидание и дисперсию – $M[f(x)] = f_c$ и $D[f(x)] = \sigma_f^2$. Для вычисления вероятности попадания значения ФЦ в заданный диапазон для заданных величин x_c и σ_x случайным образом сформируем множество векторов $x = \{x_1, x_2, x_3, \dots x_n\}$, вычислим соответствующие значения ФЦ f_i $(i=1...n)$, и найдем количество элементов i_f, удовлетворяющих требованию $f_{min} \le f(x_i) \le f_{max}$. Полученное число нормируем путем деления на n .

Зачастую в выражение для ФЦ входит не одна переменная, а несколько. Допустим, ФЦ содержит J переменных. В таком случае используется скалярная «свертка» переменных ФЦ $\hat{f}$. Для вычисления вероятности попадания значения ФЦ в заданный диапазон для элемента множества рассчитывается вектор $f = \{f_1, f_2, f_3, \dots f_J\}$. В этом случае для каждой переменной задаются свои ограничения, а вместо требования $f_{min} \le f(x_i) \le f_{max}$ – дизъюнкция требований вида $f_{jmin} \le f_j(x_i) \le f_{jmax}$, $j = 1 \dots J$.

Следует отметить, что часто в задачах стохастической оптимизации необходимо наблюдать за изменениями математического ожидания и дисперсии ФЦ одновременно, не допускать превышения ими заданных значений. Для решения этой проблемы рассматриваются модели со смешанными условиями. Обозначенные условия для многокритериальной задачи могут вводиться, например, в виде скалярной «свертки» ФЦ на основе концепции степенных средних Колмогорова –

$$\hat{f}^{\circ} = \sum_{i=1}^{I} \mathrm{fit}\left(\Delta_{f_i}\right) + \left(\frac{i_{\alpha,f}}{n_\alpha} - P^*\right)^2 + \\ +\beta\left[\sum_{m=1}^{M_k} \mathrm{fit}(\Delta_{x,m}^2) + \sum_{m=1}^{M_k} \mathrm{fit}\left(\frac{1}{n_\alpha}\left|\chi_{x,m}^2 - n_\alpha\right|\right)\right], \quad (7)$$

где $\Delta_{f_i} = \dfrac{M[f_i] - f_i^*}{\sigma_{f_i}^*}$, f_i^*, $\sigma_{f_i}^*$ – желаемые значения ФЦ и их средних квадратических отклонений, $i_{\alpha,f}$ – количество точек из n_α, попавших в заданный диапазон, P^* – желаемая вероятность достижения заданной ФЦ;

$$\Delta_{x,m} = \frac{M_\alpha[x_m] - x_{m,0}}{\sigma_m^*},$$

$$\chi_{x,m}^2 = \frac{n_\alpha M_\alpha\left[\left(x_m - M_\alpha[x_m]\right)^2\right]}{\left(\sigma_m^*\right)^2},$$

$x_{m,0}$ – значение переменных x_m для прототипа,

σ_m^* – средние квадратические отклонения переменных $x_{m,0}$.

Задача (7) относится к классу существенно некорректных задач [3]. Квазирешение поставленной задачи (нормальное решение) может быть найдено методом регуляризации А.Н. Тихонова:

$$\hat{X}_p^{\circ} = \arg \inf_{X^{\circ} \in D_X} \hat{f}^{\circ}(X^{\circ}, \beta_p), \quad (8)$$

при условии, что выбранная функция приспособленности – выпуклая функция.

Параметр β_p $(\beta_{p+1} = \beta_p / q, q > 1, p = 0,1,2,\dots)$ выбирался в соответствии с обобщенным принципом невязки для нелинейных задач [6]. Рассматривались каждый раз какие-либо экстремали $\hat{X}_p^{\circ}, \hat{X}_{p+1}^{\circ}$ и проверялось выполнение условия

$$\left\|f^{\circ}(\hat{X}_p^{\circ})\right\| - C(\xi + h\left\|\Delta\hat{X}_{p+1}^{\circ}\right\|) \ge 0, \ C > 1,$$

где ξ – погрешность определения $\left\|f^*\right\|$, $h \ge \hat{f}^{\circ}(\hat{X}_{p+1}^{\circ}, \beta_{p+1}) / \left\|\Delta\hat{X}_{p+1}^{\circ}\right\|$.

Если оно выполнялось, то в качестве приближения к квазирешению выбирали экстремаль, подчиненную требованию $\left\|f^{\circ}(\hat{X}^{\circ})\right\| \le C(\xi + h\left\|\Delta\hat{X}^{\circ}\right\|)$. В противном случае экстремаль выбиралась из условия $\left\|f^{\circ}(\hat{X}^{\circ})\right\| \ge C(\xi + h\left\|\Delta\hat{X}^{\circ}\right\|)$.

Решение задачи (8) осуществлялось с помощью эволюционного метода[4].

Пример решения поставленных задач

Рассмотрим в качестве примера диагностирование проточной части трехвального ТРДД типа Д-36. Пусть критериями качества, характеризующими состояние объекта диагностирования, в рассматриваемом случае являются удельный расход топлива $C_{УД}$ и удельная тяга $R_{УД}$.

Определим компоненты векторов допустимых отклонений значений этих критериев от эталонных значений:

$$\varepsilon_{w1}^{+,-} = \frac{2(C_{УД}^{+,-} - C_{УД}^*)}{(C_{УД})_{max} - (C_{УД})_{min}};$$

$$\varepsilon_{w2}^{+,-} = \frac{2(R_{УД}^{+,-} - R_{УД}^*)}{(R_{УД})_{max} - (R_{УД})_{min}}, \quad (8)$$

где $C_{УД}^* = (C_{УД})_0$, $R_{УД}^* = (R_{УД})_0$.

Рассмотрим обратную задачу интервального анализа (5) – задачу о назначении допусков на параметры P° и переменные S°, соответствующие исправному состоянию системы в целом. Выберем нижнее и верхнее значения оценок границ, например: $\Delta C_{УД}^- = 0$; $\Delta C_{УД}^+ = 2$; $\Delta R_{УД}^- = -3$; $\Delta R_{УД}^+ = 0$; а также средние квадратические отклонения критериев качества: $\sigma_C^* = 2{,}3 \cdot 10^{-4}$ кг/(Н·ч) и $\sigma_R^* = 0{,}338$ Н·с/кг. Очевидно, что значения $\varepsilon_{w1}^{+,-}$ и $\varepsilon_{w2}^{+,-}$ могут быть теперь определены с использованием (8).

После нахождения множества

$$\{(\varepsilon_p^-, \varepsilon_p^+)_j\}, j = 1...J_k$$

с использованием ИММ объекта диагностирования (4) может быть найдено множество $\{(\varepsilon_s^-, \varepsilon_s^+)_l\}$ для каждого k-го сценария отказа системы в целом.

Возможные дефекты и соответствующие им параметры в ИММ для ТРДД типа Д-36 представлены в [7].

В качестве ИММ в данной работе использовалась термодинамическая модель ТРДД, предназначенная для решения задач проектирования [5].

Анализ результатов обработки статистических данных по выявлению отказов ФЭ ТРДД типа Д-36 показал, что на долю множественных отказов приходится около 11,46 % от их общего количества [2]. В данной работе для анализа было отобрано два характерных сценария, когда отказ ТРДД в целом был обусловлен именно множественными отказами ФЭ:

– вентилятора, компресора среднего давления, компресора высокого давления (сценарий 1);

– компресора высокого давления, камеры сгорания, турбины высокого давления (сценарий 2).

Результаты расчетов параметров ИММ и соответствующих им симптомов для различных сценариев отказа при $m = \text{const}$, $\pi_{BII} = \text{const}$, $\pi_I = \text{const}$, $T_Г = \text{const}$ ($\Delta C_{УД}^+ = 2$, $\Delta R_{УД}^- = -3$, при заданных средних квадратических отклонениях критериев качества, а также известных номинальных значениях искомых переменных прототипа и их средних квадратических отклонений: $\sigma_\eta^* = 0,003$, $\sigma_{\sigma_{КС}}^* = 0,003$) для $\beta = 1,0$ представлены в табл. 1.

Таблица 1

Результаты расчетов параметров и соответствующих им симптомов для двух сценариев отказа

	Сценарий			Сценарий	
	1	2		1	2
$\Delta\hat{\eta}_В^\circ$	-3,306		$\hat{\sigma}_{\eta_В}$	0,00223	
$\Delta\hat{\eta}_{КСД}^\circ$	-0,080		$\hat{\sigma}_{\eta_{КСД}}$	0,00257	
$\Delta\hat{\eta}_{КВД}^\circ$	-1,991	-3,329	$\hat{\sigma}_{\eta_{КВД}}$	0,00215	0,00220
$\Delta\hat{\sigma}_{КС}^\circ$		-1,954	$\hat{\sigma}_{\sigma_{КС}}$		0,00236
$\Delta\hat{\eta}_{ТВД}^\circ$		-0,083	$\hat{\sigma}_{\eta_{ТВД}}$		0,00287
$\Delta\hat{G}_Т^\circ$	-0,969	-1,218	$\hat{\sigma}_{G_Т}$	1,591	1,087
$\Delta\hat{T}_{ТСД}^\circ$	-0,499	-0,705	$\hat{\sigma}_{T_{ТСД}}$	0,728	0,509

Таким образом, решена задача интервального анализа в условиях неопределенности входных данных:

– для сценария 1 –

$$\{\Delta C_{УД}^\circ \in [0;2],\ \Delta R_{УД}^\circ \in [-3;0]\} \to$$

$$\{\Delta\hat{G}_Т^\circ \in [-0{,}97;0],\ \Delta\hat{T}_{ТСД}^\circ \in [-0{,}49;0]\};$$

– для сценария 2 –

$$\{\Delta C_{УД}^\circ \in [0;2],\ \Delta R_{УД}^\circ \in [-3;0]\} \to$$

$$\{\Delta\hat{G}_Т^\circ \in [-1{,}22;0],\ \Delta\hat{T}_{ТСД}^\circ \in [-0{,}71;0]\}.$$

При $\hat{\sigma}_{G_Т} \le 1,087$ кг/с и $\hat{\sigma}_{T_{ТСД}} \le 0,509$ °К получено, что интервалы значений симптомов, соответствующих исправному техническому состоянию, отличаются. На основе анализа расчетных данных, полученных с помощью ИММ, установлено, что в частности для сценария 2 – $\Delta\sigma_{КС}^\circ$, $\Delta\eta_{ТВД}^\circ$ не влияют на $\Delta G_Т^\circ$, $\Delta T_{ТСД}^\circ$.

Предположим, что в процессе мониторинга технического состояния выбранного экземпляра объекта исследования зафиксированы следующие значения симптомов: $\Delta G_Т^\circ = -1,093$, $\Delta T_{ТСД}^\circ = -0,602$, а также соответствующие им средние квадратические отклонения $\sigma_{G_Т}^* = 1,087$ кг/с и $\sigma_{T_{ТСД}}^* = 0,509$ °К. Следует отметить, что наблюдаемые значения не принадлежат интервалу значений симптомов, соответствующих исправному техническому состоянию рассматриваемого объекта диагностирования, согласно сценарию 1.

Результаты расчетов параметров и соответствующих им оценок достигнутых критериев качества для двух сценариев отказа при зафиксированных значениях симптомов и средних квадратических отклонениях ($m = \text{const}$, $\pi_{BII} = \text{const}$, $\pi_I = \text{const}$, $T_Г = \text{const}$) для $\beta = 1,0$ представлены в табл. 2.

Таблица 2

Результаты расчетов параметров
и соответствующих им оценок достигнутых критериев качества для двух сценариев отказа

	Сценарий			Сценарий	
	1	2		1	2
$\Delta\hat{\eta}^{\circ}_{В}$	-3,388		$\hat{\sigma}_{\eta_В}$	0,00201	
$\Delta\hat{\eta}^{\circ}_{КСД}$	-0,387		$\hat{\sigma}_{\eta_{КСД}}$	0,00209	
$\Delta\hat{\eta}^{\circ}_{КВД}$	-2,038	-2,867	$\hat{\sigma}_{\eta_{КВД}}$	0,00214	0,00254
$\Delta\hat{C}^{\circ}_{УД}$	2,737	1,093	$\hat{\sigma}_C$	0,000141	$8{,}91\cdot10^{-5}$
$\Delta\hat{R}^{\circ}_{УД}$	-3,745	-2,114	$\hat{\sigma}_R$	0,312	0,249

При выборе управляющих переменных для сценария 2 учитывалось, что $\Delta\sigma^{\circ}_{КС}$, $\Delta\eta^{\circ}_{ТВД}$ не влияют на $\Delta G^{\circ}_{Т}$, $\Delta T^{\circ}_{ТСД}$.

Таким образом, решена задача оценки величин расчетных параметров ФЭ в процессе эксплуатации на основе данных измерений симптомов.

Выводы

На основе анализа результатов вычислений можно сделать следующие выводы:

– полученные значения величин расчетных параметров ФЭ, например $\Delta\eta^{\circ}_{КВД}$, для различных сценариев отказа ТРДД в целом, отличаются;

– 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.

Литература

1. Основы технической диагностики. [Текст] Модели объектов, методы и алгоритмы диагностики. – Кн. 1 / под ред. П.П. Пархоменко. – М.: Энергия, 1976. – 464 с.

2. Экспертные модели определения множественных отказов в авиационных двигателях [Текст] / С.А. Дмитриев, А.Е. Литвиненко, Е.П. Степушкина, А.В. Попов // Вестник двигателестроения. – 2005. – №1. – С. 12-17.

3. Численные методы решения некорректных задач [Текст] / А.Н. Тихонов, А.В. Гончарский, В.В. Степанов, А.Г. Ягола. – М.: Наука, 1990. – 232 с.

4. Применение эволюционных методов для определения интервалов симптомов, соответствующих исправному состоянию газотурбинных двигателей [Текст] / Е.М. Угрюмова, А.А. Трончук, И.А. Трофимова, В.С. Безуглая // Вестник двигателестроения. – 2009. – № 3. – С. 153-159.

5. Теория воздушно-реактивных двигателей [Текст] / под ред. С.М. Шляхтенко. – М.: Машиностроение, 1975. – 568 с.

6. Гончарский, А.В. Обобщенный принцип невязки [Текст] / А.В. Гончарский, А.С. Леонов, А.Г. Ягола // Журнал вычислительной математики и математической физики. – 1973. – Т. 13, № 2. – С. 294-302.

7. Применение эволюционных методов для оценки параметров узлов газотурбинных двигателей на основе данных измерений в процессе эксплуатации [Текст] / Е.М. Угрюмова, А.А. Трончук, А.В. Меняйлов, В.Е. Афанасьевская // Проблемы машиностроения. – 2010. – Т. 13, № 2. – С. 68-76.

Поступила в редакцию 20.05.2012

Рецензент: д-р техн. наук, проф., зав. каф. 203 С.В. Епифанов, Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Харьков.

МЕТОД РОЗВ'ЯЗАННЯ ЗАДАЧ ДІАГНОСТИКИ ТЕХНІЧНОГО СТАНУ ГАЗОТУРБІННИХ ДВИГУНІВ НА ОСНОВІ ВИМІРЮВАНЬ ГАЗОДИНАМІЧНИХ ПАРАМЕТРІВ В УМОВАХ НЕВИЗНАЧЕНОСТІ ВХІДНИХ ДАНИХ

В.Є. Афанасьєвська, О.А. Трончук, К.М. Угрюмова, М.В. Рожкова

Розглянуто умовно-коректні математичні постановки та метод розв'язання задач діагностики складних технічних систем із множинними відмовами на основі концепції допускного контролю: пошуку інтервалів значень симптомів, які відповідають справному технічному стану, а також оцінки величини розрахункових параметрів функціональних елементів під час експлуатації на основі даних вимірювань симптомів в умовах невизначеності вхідних даних шляхом зведення цих задач до задач стохастичної оптимізації. Розглянуто приклади реалізації запропонованого методу при розв'язанні задач діагностики для сучасного двоконтурного турбореактивного двигуна типу Д-36 для пасажирського регіонального літака.

Ключові слова: технічна діагностика, допускний контроль, стохастична оптимізація, еволюційний метод.

DIAGNOSTIC PROBLEM SOLUTION METHOD OF GAS TURBINE ENGINE TECHNICAL STATE ON BASIS OF THE GAS-DYNAMIC PARAMETERS MEASURING IN INPUT DATA INDETERMINACY CONDITION

V.E. Afanasjevska, A.A. Tronchuk, E.M. Ugryumova, M.V. Rozhkova

The conditional-correct diagnostics problems statement and solution method for complex technical system with multiple faults on basis of tolerance control concept are considered. There are finding the symptoms values intervals proper to operative technical condition and estimating the calculated functional units' parameters values during operation on basis of measuring data in input data indeterminacy condition. These problems are reduced to the stochastic optimization problems. The realization examples of the offered method for the diagnostic problem solution of a modern bypass turbojet engine like D-36 for a passenger regional airplane are considered.

Key words: technical diagnostics, tolerance control, stochastic optimization, evolutionary method.

Афанасьевская Виктория Евгеньевна – аспирант кафедры информатики Национального аэрокосмического университета им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Харьков, Украина, e-mail: miss_victoria@ukr.net.

Трончук Алексей Адамович – ассистент кафедры информатики Национального аэрокосмического университета им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Харьков, Украина, e-mail: alextx@mail.ru.

Угрюмова Екатерина Михайловна – канд. техн. наук, старший преподаватель кафедры информатики Национального аэрокосмического университета им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Харьков, Украина, e-mail: ukatya80@mail.ru.

Рожкова Мария Валерьевна – студент факультета систем управления летательных аппаратов Национального аэрокосмического университета им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Харьков, Украина, e-mail: Rozhkova_masha@mail.ru.