

Теоретичні основи розробки систем озброєння

УДК 61.2:004.93

В.Е. Афанасьевская¹, Е.М. Угрюмова¹, С.И. Шматков²

¹Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ»

²Харьковский национальный университет имени В.Н. Каразина

МЕТОДОЛОГИЯ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ ДИАГНОСТИКИ СЛОЖНЫХ ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ

Рассмотрена классификация задач интеллектуальной диагностики технического состояния сложных технических систем. Сформулированы условно-корректные постановки задач диагностирования авиационных двигателей с множественными отказами – определения интервалов значений симптомов, соответствующих исправному техническому состоянию объекта диагностирования, оценки величин расчетных параметров функциональных элементов в процессе эксплуатации на основе данных измерений симптомов – путем сведения этих задач к задачам модификации. Синтез квазирешений задач осуществлялся путем регуляризации поиска экстремума сглаживающего функционала с использованием метода А.Н. Тихонова – для обеспечения единственности и устойчивости решений относительно малых вариаций входных данных. Выбор параметра регуляризации осуществлялся в соответствии с обобщенным принципом невязки. Рассмотрены примеры реализации предлагаемой методологии при решении задач диагностирования современного турбореактивного двигателя для пассажирского регионального самолета.

Ключевые слова: интеллектуальная диагностика, некорректные задачи, методы регуляризации, диагностические признаки, классы дефектов.

Введение

На сегодняшний день разработаны и описаны различные задачи диагностики технического состояния сложных технических систем (СТС). Все их можно разделить на три класса:

- 1) анализ технического состояния на основе математического моделирования СТС с дефектами;
- 2) анализ технического состояния на основе обработки данных, полученных путем регистрации параметров процессов в функциональных элементах (ФЭ);
- 3) анализ технического состояния на основе комбинирования первого и второго подходов.

Рассмотрим более подробно первые два класса задач.

Задача анализа технического состояния на основе математического моделирования СТС с дефектами подразделяется на прямую и обратную [1, 2].

Прямая задача включает в себя построение математической модели СТС, параметрическую идентификацию этой математической модели [3], а также параметрический анализ технических состояний СТС [4]. Для корректного решения задачи необходимо иметь эталонную и формальную математические модели [5]. Эталонная модель может представлять собой набор обыкновенных дифференциальных уравнений или набор дифференциальных уравнений в частных производных [2]. Формальная модель задается либо в форме уравнений регрессии [6], могут использоваться при этом методы аппроксимации

(например, метод группового учета аргументов [7], искусственные нейронные сети [8], методы нечеткой логики), либо как имитационная модель (модель системной динамики, дискретно-событийная модель, мультиагентная модель). Параметрический анализ технических состояний СТС дает возможность определить симптомы, параметры диагностических признаков системы и сформировать критерии отказов [4].

Обратная задача состоит в выявлении отклонений значений симптомов и параметров, определяющих диагностические признаки [2], а также в предотвращении появления отказов путем синтеза закона оптимального управления системой [9], т.е. законов изменения векторов параметров, определяющих диагностические признаки.

Задачи анализа технического состояния на основе обработки данных, полученных путем регистрации параметров процессов в функциональных элементах, в свою очередь, делятся на задачи допускового контроля [10] и прогнозирования технического состояния СТС [2].

В рамках допускового контроля решаются следующие задачи:

- формирование диагностических признаков и соответствующих им параметров и симптомов [11];
- построение системной диагностической модели [5]. Диагностическая модель может быть графической, имитационной, нечеткой, в виде таблицы неисправностей, таблицы «симптом-дефект», в форме уравнений регрессии, в форме продукцион-

ных правил. Нечеткие диагностические модели определяют функции принадлежности симптомов, соответствующих исправному техническому состоянию, и строятся в виде набора нечетких отношений или нечетких продукций [12]. Диагностические модели в форме продукционных правил и нечеткие диагностические модели дают возможность построения диагностических гипотез, связывающих перечень дефектов и наблюдаемых симптомов.

– определение интервалов значений симптомов, соответствующих исправному техническому состоянию, с использованием интервальных и нечетких математических моделей [13];

– построение моделей для представления классов дефектов [10];

– классификация дефектов. Под классификацией дефектов подразумевают распознавание классов возможных состояний системы и определение какому классу соответствуют наблюдаемые значения симптомов по данным измерений. Для решения данных задач используют методы классификации (например, метод К-средних [14], искусственные нейронные сети [8]).

– планирование графика работ и распределения ресурсов при проверке технического состояния системы. На основе моделей систем с распределенными параметрами методами логистики производится синтез оптимального графика работ и распределения ресурсов [1].

Для решения задач прогнозирования технического состояния СТС используют методы экспертных оценок, предсказывающие фильтры, нечеткие рекуррентные модели, искусственные нейронные сети, методы построения и анализа временных рядов (спектральный анализ, вейвлет-анализ).

Предложенная классификация задач охватывает все этапы интеллектуальной диагностики технического состояния СТС от формирования признаков и математической модели диагностирования до прогнозирования состояния системы в будущем.

Актуальной остается задача построения математических моделей диагностики, которые бы в полной мере отображали физические характеристики, свойства технической системы и были бы достаточно простыми, наглядными и робастными. Представляют также практический интерес математические методы решения задач нахождения интервалов значений симптомов, соответствующих исправному техническому состоянию, а также оценки величин расчетных параметров функциональных элементов в процессе эксплуатации на основе данных измерений симптомов, которые относятся к классу некорректных задач.

В данной работе предложены условно-корректные постановки задач диагностирования авиационного двигателя с множественными отказами – нахождения интервала значений симптомов, соответствующих исправному техническому состоянию

объекта диагностирования, а также оценки величин расчетных параметров функциональных элементов в процессе эксплуатации на основе данных измерений симптомов путем сведения этих задач к так называемым задачам модификации [15, 16]. Синтез квази-решений задач осуществлялся путем регуляризации поиска экстремума сглаживающего функционала с использованием метода А.Н. Тихонова – для обеспечения единственности и устойчивости решений относительно малых вариаций входных данных. Выбор параметра регуляризации осуществлялся в соответствии с обобщенным принципом невязки. Рассмотрены примеры реализации предлагаемого метода при решении задачи диагностирования для современного турбореактивного двигателя пассажирского регионального самолета.

Постановка задачи диагностирования

Авиационный двигатель (АД), являющийся объектом диагностирования (ОД), рассматривается как сложная техническая система (СТС), состоящая из взаимодействующих подсистем и функциональных элементов. В каждом из них могут возникать в процессе эксплуатации 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:

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

$$\delta_{f0} = f^{\circ} - f_0^{\circ}; \quad \delta_f^{*} = f^{\circ} - f^{*},$$

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

F_0 – значение параметра (переменной), соответствующее прототипу;

$$\langle F \rangle = \frac{F_{\max} + F_{\min}}{2}; \quad (F_0, F^{*}) \in [F_{\min}, F_{\max}];$$

$$(f^{\circ}, f^{*}, \delta_{f0}, \delta_f^{*}) \in [-1, 1].$$

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

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

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

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 $W^\circ = \{w_i^\circ\}$, $i = 1 \dots I$. 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

$$\forall i = 1 \dots I : (\delta_{wi} \leq \varepsilon_{wi}^+) \wedge (\delta_{wi} \geq \varepsilon_{wi}^-) = \text{true},$$

то можно утверждать, что объект диагностирования находится в нормальном (исправном, работоспособном) состоянии. Если же справедливо логическое выражение

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

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 ввиду, что возможно существование подмножества значений $\{q_k^\circ\}, q_k^\circ \subset q^\circ, k = 1 \dots K$, приводящих к возникновению отказа системы в целом, где K – число возможных сценариев.

Будем понимать под дефектом $f_j, j = 1 \dots J_k$ функционального элемента повреждение, которое характеризуется отклонением текущего значения вектора q_j° от эталонного значения q_j^* . Каждому дефекту $f_j, j = 1 \dots J_k$, как диагностическому признаку, можно поставить в соответствие один или, в общем случае, подмножество характеризующих его параметров $\{P_{jt}\}, P_{jt} \in P_j^\circ, t = 1 \dots T_j$, 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:

$\forall j = 1 \dots J_k : (\delta_{qj} > \varepsilon_{qj}^+) \vee (\delta_{qj} < \varepsilon_{qj}^-) = \text{true}$ – говорят, что наблюдается отказ j -того функционального элемента сложной технической системы.

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

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

Будем предполагать, что объект диагностирования оснащен автоматизированной системой контроля и диагностики (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 (2), отражающий возникновение отказа объекта диагностирования в целом по k -тому сценарию, можно переписать в виде:

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

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

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

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

где $P^\circ = (\Pi^\circ, U^\circ)$. Следует отметить, что в результате декомпозиции ИММ можно выявить подмножество частных математических моделей (ЧММ) вида $s_{kl}^\circ = \phi(P_l^\circ), l = 1 \dots L_k$, где L_k – число симптомов для k -того сценария, $P_l^\circ = \{P_{lj}\}, j = 1 \dots J_l, J_l$ – число параметров в l -той ЧММ. Поэтому, если в k -том сценарии отказа системы в целом мы наблюдаем подмножество $S_k^\circ = \{s_{kl}^\circ\}, S_k^\circ \subseteq S^\circ, l = 1 \dots L_k$, 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 $\{P_{lj}\}, j = 1 \dots J_k$, где

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

С помощью (4) может быть решена для каждого сценария прямая задача интервального анализа:

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

$$j = 1 \dots J_k, l = 1 \dots L_k, i = 1 \dots I, k = 1 \dots K.$$

Переход объекта диагностирования в аномальное состояние требует решения задачи диагностирования, которая формулируется следующим образом: исходя из измеренных значений симптомов S° , 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:

– задачи структурного анализа – по заданным структурной и системной диагностической моделям объекта (таблица неисправностей, таблица «симптом – дефект») построение дерева отказов, позволяющего определить связи между дефектами функциональных элементов, симптомами и отказами системы в целом;

– задачи классификации – определение возможного количества состояний (сценариев отказов), в которых может оказаться авиационная система. Методология решения задачи следующая: задается модель объекта в виде таблицы неисправностей, таблицы «симптом – дефект», по ним строится дерево отказов, затем дерево событий. Другой формой результата решения задачи может быть диагностическая логическая модель (диагностическая гипотеза);

– задачи диагноза – определение состояния, в котором объект диагностирования находится в настоящий момент. Результатом является распознавание принадлежности образа тому или иному сценарию;

– обратной задачи интервального анализа для каждого сценария – нахождение интервалов значений симптомов, соответствующих исправному техническому состоянию объекта диагностирования с множественными отказами:

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

На основе полученных результатов формируются 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 $\delta_{sl} \neq 0$; а также перечня параметров $\{P_{lj}\}$, $j=1..J_a$, соответствующих наблюдаемым симптомам S_a° ;

– распознавания образов – определения технического состояния объекта диагностирования, т.е. вида сценария отказа системы в целом, который достоверно соответствует наблюдаемым симптомам. Результатом решения этой задачи будет подмножество $S_k^\circ = \{s_{kl}^\circ\}$,

$S_l^\circ \subseteq S^\circ, l \in [1, L_k]$, где L_k – число симптомов, фактическое отклонение текущих значений s_{kl}° которых, выходя за пределы $[\varepsilon_{sl}^-, \varepsilon_{sl}^+]$ для этого сценария, а также подмножество параметров $\{P_{lj}\}$, $j=1..J_k$, соответствующих наблюдаемым симптомам S_k° ;

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

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

– определения функциональных элементов, отказ которых привел к отказу системы в целом. Результатом решения этой задачи будет подмножество $\{P_{lj}\}$, $l=1..L_k$, $j=1..J_a$, где J_a – число параметров, фактическое отклонение текущих значений P_{lj}

которых, выходя за пределы $[\varepsilon_{pl}^-, \varepsilon_{pl}^+]$ для этого сценария;

– составления графика работ для обслуживающего персонала по обнаружению отказавших функциональных элементов.

Далее рассмотрим методы решения перечисленных выше задач.

Метод определения связей между дефектами функциональных элементов, симптомами и отказами системы

Рассмотрим системную диагностическую модель объекта, которая задана таблицей «симптом – дефект». Общий вид данной модели – бинарная диагностическая матрица следующего вида:

| | f_1 | f_2 | ... | f_m |
|-------|---------------|---------------|-----|---------------|
| s_1 | α_{11} | α_{12} | ... | α_{1m} |
| s_2 | α_{21} | α_{22} | ... | α_{2m} |
| ... | ... | ... | ... | ... |
| s_n | α_{n1} | α_{n2} | ... | α_{nm} |

Здесь s_i , $i=1..n$ – наблюдаемые симптомы, f_j , $j=1..m$ – существующие дефекты объекта, α_{ij} , $i=1..n$, $j=1..m$ – отражает влияние дефектов на симптомы в виде логических значений $\alpha_{ij} = \{0,1\}$.

По таблице «симптом – дефект» строим диагностическую гипотезу [15]. Таким образом наглядно определяются отношения между дефектами ФЭ, симптомами и отказами.

Метод определения количества возможных сценариев отказов объекта диагностирования

Методология решения задачи следующая: задается модель объекта в виде таблицы неисправностей, таблицы «симптом – дефект», по ним строится дерево отказов, затем дерево событий. На основе анализа дерева событий делается заключение о количестве возможных сценариев отказов объекта. Другой формой результата решения задачи может быть диагностическая логическая модель [16].

Метод определения состояния объекта в наблюдаемый момент времени

Задача определения состояния объекта диагностирования в определенный момент времени эквива-

лентна задаче определения отказа системы, достоверно соответствующего наблюдаемым симптомам. Для решения этой задачи применяется вероятностная нейронная сеть [8]. На вход сети подаются наблюдаемые симптомы, в результате выявляем тот отказ системы, вероятность появления которого наибольшая.

Метод нахождения интервалов значений симптомов, соответствующих исправному техническому состоянию объекта диагностирования

Введем отображение $G: \{w_i^\circ\} \rightarrow \hat{w}^\circ$, определяющее обобщенную функцию цели:

$$\hat{w}^\circ(P^\circ, \beta) = \sum_{i=1}^l (\delta_{wi} - \varepsilon_{wi}^{+, -})^2 + \beta \sum_{j=1}^{J_k} (\delta_{pj})^2, \quad (7)$$

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

Задача (7) относится к классу существенно некорректных задач. Квазирешение поставленной задачи (нормальное решение) может быть найдено методом регуляризации А.Н. Тихонова [17]:

$$\begin{aligned} \hat{P}_m^\circ &= \arg \min_{P^\circ \in \pi} \hat{w}^\circ(P^\circ, \beta_m); \\ \pi &= \{P^\circ \in R^n : P^\circ \in [-1, 1]\}. \end{aligned} \quad (8)$$

Параметр β_m выбирался в соответствии с обобщенным принципом невязки.

После нахождения множества $\{(\varepsilon_p^-, \varepsilon_p^+)\}_j, j=1...J_k$ с использованием исходной математической модели объекта диагностирования (4) может быть найдено множество $\{(\varepsilon_s^-, \varepsilon_s^+)\}_j$ для каждого k -го сценария отказа системы в целом.

Метод определения расчетных параметров ФЭ

Рассмотрим подробнее задачу оценки величин расчетных параметров функциональных элементов в процессе эксплуатации на основе данных измерений симптомов S° (6). Исходными 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 P_{lj} , для которых $\delta_{sl} \neq 0$, а также перечень параметров $\{P_{lj}\}_j, j=1...J_a$, 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}^* .

Определим компоненты вектора допустимых отклонений значений s_{al} от эталонных значений:

$$\varepsilon_{sl} = \frac{2(s_{al} - s_{l}^*)}{(s_{l})_{\max} - (s_{l})_{\min}}, \text{ а также значения оценок } s_{al} : \Delta s_{al}^\circ = \frac{s_{al} - s_{al}^*}{s_{al}^*}, \text{ где } s_{l}^* = s_{l,0}.$$

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

$$\hat{w}^\circ(P^\circ, \beta) = \sum_{l=1}^{L_a} (\delta_{sl} - \varepsilon_{sl})^2 + \beta \sum_{j=1}^{J_a} (\delta_{pj})^2, \quad (9)$$

где G – система предпочтений лица принимающего решение (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}° выходят за пределы $[\varepsilon_{sl}^-, \varepsilon_{sl}^+]$ для этого сценария, а также перечень параметров $\{P_{lj}\}_j, j=1...J_k$, соответствующих наблюдаемым симптомам S_k° . В этом случае в формуле (9) можно будет выполнить замену пределов суммирования: $L_a \rightarrow L_k, J_a \rightarrow J_k$.

Задача (9) относится к классу существенно некорректных задач. Квазирешение поставленной задачи (нормальное решение) может быть найдено методом регуляризации А.Н. Тихонова [17]:

$$\begin{aligned} \hat{P}_m^\circ &= \arg \min_{P^\circ \in \pi} \hat{w}^\circ(P^\circ, \beta_m); \\ \pi &= \{P^\circ \in R^n : P^\circ \in [-1, 1]\}. \end{aligned} \quad (10)$$

Параметр β_m выбирался в соответствии с обобщенным принципом невязки.

Результаты численного решения поставленной задачи

Рассмотрим в качестве примера диагностирование проточной части трехвального турбореактивного двигателя (ТРДД) типа Д-36. Пусть критериями качества, характеризующими состояние объекта диагностирования, в рассматриваемом случае являются удельный расход топлива $C_{уд}$ и удельная тяга $R_{уд}$ АД. Определим компоненты векторов допустимых отклонений значений этих критериев от эталонных значений:

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

$$\varepsilon_{w2}^{+,-} = \frac{2(R_{yD}^{+,-} - R_{yD}^*)}{(R_{yD})_{\max} - (R_{yD})_{\min}}, \quad (11)$$

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

Рассмотрим обратную задачу интервального анализа (5) – задачу о назначении допусков на параметры P° и переменные S° , соответствующие исправному состоянию системы в целом [18]. Выберем нижнее и верхнее значения оценок границ, например: $\Delta C_{yD}^- = 0$; $\Delta C_{yD}^+ = 2$; $\Delta R_{yD}^- = -3$; $\Delta R_{yD}^+ = 0$. Очевидно, что значения $\varepsilon_{w1}^{+,-}$ и $\varepsilon_{w2}^{+,-}$ могут быть теперь определены с использованием (11).

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

Далее рассмотрим решение задачи оценки величин расчетных параметров функциональных элементов в процессе эксплуатации на основе данных измерений симптомов (6) [20].

Предположим, что в процессе мониторинга технического состояния выбранного экземпляра объекта исследования зафиксированы следующие значения симптомов: $\Delta G_T^\circ = -0,28$, $\Delta T_{TCD}^\circ = -0,1$.

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 $\Delta G_T^\circ = -0,28$; $\Delta T_{TCD}^\circ = -0,1$ ($m = \text{const}$, $\pi_{ВII} = \text{const}$, $\pi_I = \text{const}$, $T_T = \text{const}$) для $\beta = 0,001$ представлены в таблице. При выборе управляющих переменных для сценария 2 учитывалось, что $\Delta \sigma_{KC}^\circ$, $\Delta \eta_{ТВД}^\circ$ не влияют на ΔG_T° , ΔT_{TCD}° .

Таблица 1

Результаты расчетов параметров и соответствующих им оценок достигнутых критериев качества для двух сценариев отказа при $\Delta G_T^\circ = -0,28$; $\Delta T_{TCD}^\circ = -0,1$ ($m = \text{const}$, $\pi_{ВII} = \text{const}$, $\pi_I = \text{const}$, $T_T = \text{const}$)

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

Выводы

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:

- 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 $m = \text{const}$, $\pi_{ВII} = \text{const}$, $\pi_I = \text{const}$, $T_T = \text{const}$ – ΔG_T° , ΔT_{TCD}° не зависят от $\Delta \sigma_{КС}^\circ$, $\Delta \eta_{ТВД}^\circ$.

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.

Список литературы

1. Юлдыбаев Л.Х. Методы технической диагностики основанные на использовании математических моделей / Л.Х. Юлдыбаев, А.П. Тунаков, А.М. Ахмедзянов

// Испытания авиац. двигателей: межвуз. науч. сб. – Уфа: УАИ, 1977. – Вып. 5. – С. 35-38.

2. Основы технической диагностики. Кн.1. Модели объектов, методы и алгоритмы диагностики / Под ред. П.П. Пархоменко – М.: Энергия, 1976. – 464 с.

3. Интеллектуальные средства диагностики и прогнозирования надежности авиадвигателей: моногр. / В.И. Дубровин, С.А. Субботин, А.В. Богуслаев, В.К. Яценко. – Запорожье: ОАО «Мотор-Сич», 2003. – 279 с

4. Александров В.В. Метод выбора диагностических параметров при распознавании неисправностей в технических системах / В.В. Александров, А.К. Дмитриев, Р.И. Полонников // Приборостроение. – 1973. – № 7. – С. 116-120.

5. Сафарбаков А.М. Основы технической диагностики: уч. пособ. / А.М. Сафарбаков, А.В. Лукьянов, С.В. Пахомов. – Иркутск: ИрГУПС, 2006. – 216 с.

6. Химмельбау Д. Анализ процессов статистическими методами / Д. Химмельбау. – М.: Мир, 1973. – 957 с.

7. Реклейтис Г. Оптимизация в технике: в 2-х кн. Кн. 1: пер. с англ. / Г. Реклейтис, А. Рейвиндран, К. Рэгсдел. – М.: Мир, 1986. – 350 с.

8. Высочина О.С. Модель системы мониторинга телекоммуникационной сети на базе модифицированной вероятной нейронной сети / О.С. Высочина, С.И. Шматков, А.М. Салман // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – Х., 2010. – № 5. – С. 67-71.

9. Кулик А.С. Сигнально-параметрическое диагностирование систем управления / А.С. Кулик. – Х.: ХАИ, Бизнес «Информ», 2000. – 206 с.

10. Иванов Ю.П. Контроль и диагностика измерительно-вычислительных комплексов: учеб. пособ. / Ю.П. Иванов, В.Г. Никитин, В.Ю. Чернов. – СПб.: СПбГУАП, 2004. – 98 с.

11. Доценко Б.И. Диагностирование динамических систем / Б.И. Доценко. – К.: Техника, 1983. – 159 с.

12. Babuska R. Fuzzy modeling for control / R. Babuska. – Boston/Dordrecht/London : Kluwer Academic Publishers, 1998. – 232 p.

13. Биргер И.А. Техническая диагностика / И.А. Биргер. – М.: Машиностроение, 1978. – 239 с.

14. Применение методов нечеткой кластеризации при решении задач диагностики авиационных двигателей / В.Е. Афанасьевская, О.С. Радивоненко, А.Ю. Соколов, М.Л. Угрюмов // Авиационно-космическая техника и технология. – Х.: НАКУ «ХАИ». – № 8(75). – 2010. – С. 128-132.

15. Sokolov A.Yu., Ugryumov M.L., Trofimova I.A. Fault Diagnostics of Turbo Jet Engines Based on Multiagent Approach // Abstracts Book and CD-ROM Proceedings of the 9-th Asian International Conference on Fluid Machinery. – Jeju, Korea. – 2007. – 8 p. (AICFM9-285).

16. Ugryumov M.L. Gas turbine engine diagnostibility analysis / M.L. Ugryumov, A.Yu.Sokolov, I.A. Trofimova, K.M. Ugryumova // CD-ROM Abstracts and Proceedings of the Sixth International Conference on Condition Monitoring and Machinery Failure Prevention Technologies. – Dublin, Ireland. – 2009. – P. 1011 - 1022 (CM-MFPT-119-2009).

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

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

19. Попов А.В. Исследование динамических характеристик ТРДД с перемежающимися неисправностями проточной части на установившихся режимах его работы / А.В. Попов // Авиационно-космическая техника и технология. – 2007. – № 2 (38). – С. 63-67.

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

Поступила в редколлегию 21.10.2010

Рецензент: д-р техн. наук, проф. А.Ю. Соколов, Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ».

МЕТОДОЛОГІЯ ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ ДІАГНОСТИКИ СКЛАДНИХ ТЕХНІЧНИХ СИСТЕМ

В.Є. Афанасьєвська, К.М. Угрюмова, С.І. Шматков

Розглянута класифікація задач інтелектуальної діагностики технічного стану складних технічних систем. Сформульовані умовно-коректні постановки задач діагностування авіаційних двигунів із множинними відмовами – визначення інтервалів значень симптомів, які відповідають справному технічному стану об'єкта діагностування, оцінки величин розрахункових параметрів функціональних елементів під час експлуатації на основі даних вимірювань симптомів – шляхом зведення цих задач до задач модифікації. Синтез квазірозв'язань задач відбувається шляхом регуляризації пошуку екстремуму згладжу вального функціонала із використанням методу А.Н. Тихонова – для забезпечення єдності й стійкості розв'язань відносно малих варіацій даних. Вибір параметра регуляризації здійснювався у відповідності до узагальненого принципу відхилу. Розглянуті приклади реалізації запропонованої методології під час розв'язання задач діагностування сучасного турбореактивного двигуна для пасажирського регіонального літака.

Ключові слова: інтелектуальна діагностика, некоректні задачі, методи регуляризації, діагностичні ознаки, класи дефектів.

INTELLIGENT DIAGNOSTICS METHODOLOGY OF COMPLEX TECHNICAL SYSTEMS

V.E. Afanasjevska, E.M. Ugryumova, S.I. Shmatkov

An intelligent diagnostics problems of complex engineering system operating conditions classification was considered. Related correct aircraft engines with multiple failure diagnostic problems definitions were formulated. These problems are definition the symptoms values interval, that conform to operable operating condition of unit under test, and estimating the functional unit design parameter values during an operating process on basis of current symptoms measuring. The second problem is solved by reduction to modification problem. Problems quasisolutions synthesis was realized by smoothing functional extremum seeking regularization with using the A.N. Tihonov's method. This technique ensures solutions uniqueness and solutions stability about input data law variations. Regularization parameter choice was realized in compliance with generic residual principle. The examples of suggested methodology were considered for diagnostics problem solution of regional passenger aircraft modern turbojet engine.

Keywords: intelligent diagnostics, ill-posed problems, regularization method, diagnostic character, fault class.