

УДК 618.518: 629.7.036.3

**В.Е. СТРЕЛЕЦ, М.Л. УГРЮМОВ, Е.М. УГРЮМОВА, И.А. ТРОФИМОВА***Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Украина*

## **МЕТОД СИНТЕЗА МНОЖЕСТВА КОНТРОЛИРУЕМЫХ ПЕРЕМЕННЫХ ДЛЯ ДИАГНОСТИРОВАНИЯ ОТКАЗОВ ТУРБОРЕАКТИВНЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ В УСЛОВИЯХ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ ВХОДНЫХ ДАННЫХ**

*При эксплуатации авиационных систем одной из наиболее важных задач является диагностирование их технического состояния. Разработан метод синтеза множества контролируемых переменных состояния для диагностирования единичных и множественных отказов турбореактивных двигателей с учетом стохастической природы входных данных, при условии, что ошибка классификации состояния не превышает заданной величины.*

*Представлен пример применения описанного метода для определения множества контролируемых переменных при диагностировании технического состояния турбореактивного двухконтурного двигателя типа Д-36.*

**Ключевые слова:** турбореактивный двигатель, диагностирования технического состояния, контролируемые переменные, неопределенность входных данных.

### **Введение**

Диагностирование состояния авиационных турбореактивных двигателей является одной из наиболее сложных задач при технической эксплуатации авиационных систем (АС).

Существующие автоматизированные системы контроля и диагностики (АСКД), используемые для оценивания технического состояния проточной части турбореактивных двигателей по параметрам рабочего процесса, имеют сравнительно невысокий уровень достоверности, что обусловлено стохастической природой множества признаков и возможных состояний двигателя.

Задача определения контролируемых переменных, формирования диагностических моделей и синтез алгоритмов оценивания технического состояния турбореактивных двигателей имеют свою специфику [1], а именно:

— во-первых, процессы, протекающие в авиационных двигателях, разнообразны и в то же время взаимозависимы и случайны, что существенно усложняет их исследование и определение детерминированных причинно-следственных связей между техническими состояниями объекта диагностирования, и контролируемыми переменными его состояния;

— во-вторых, задача еще более усложняется при диагностировании множественных повреждений (отказов) конструктивных узлов проточной части двигателей при глубине оценки до конструктивного узла;

— в-третьих, в условиях возникновения множественных дефектов процесс определе-

ния контролируемых переменных приобретает случайный характер, другими словами появляется неопределенность в данных измеряемых контролируемых переменных для разных сценариев отказов.

Повышение качества диагностирования возможно за счет обоснованного выбора множества контролируемых переменных [2-4].

В данной работе предложен метод синтеза множества контролируемых переменных для диагностирования единичных и множественных отказов турбореактивных двигателей в условиях неопределенности входных данных.

### **1. Математическая модель синтеза рациональных решений многокритериальных задач диагностирования**

К математическим моделям и вычислительным методам, предназначенным для решения задач диагностирования, ставятся такие требования:

— высокая эффективность (низкие трудоемкость и информационная сложность);

— корректность (существование, единственность и устойчивость решений к возмущениям входных данных), в том числе — быстрая сходимость итерационных процессов вычислений, достаточная с практической точки зрения точность.

С учетом этих требований построена системная математическая модель синтеза рациональных решений многокритериальных задач диагностирования [5].

В результате декомпозиции задача диагностирования может быть представлена как последовательность взаимосвязанных задач:

- 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 (ФЭ), контролируемые переменными и отказами системы в целом;

- кластеризации – определение возможного количества состояний (сценариев отказов), в которых может оказаться АС. 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);

- классификации – определение состояния, в котором объект диагностирования находится в настоящий момент. Результатом является распознавание принадлежности образца тому или иному сценарию;

- обратной задачи интервального анализа для каждого сценария – нахождение интервалов допустимых значений контролируемых переменных, соответствующих исправному техническому состоянию объекта диагностирования с множественными отказами, и необходимой точности их измерения. На основе полученных результатов формируется база данных, содержащая допуски на изменение параметров и контролируемых переменных, соответствующие исправному техническому состоянию системы в целом, а также точность их измерения;

- измерения контролируемых переменных состояния;

- определения технического состояния объекта диагностирования, т.е. вида сценария отказа системы в целом, который достоверно соответствует наблюдаемым значениям контролируемых переменных. Результатом решения этой задачи будет подмножество  $S_k^{\circ} = \{s_{ki}^{\circ}\}$ ,  $S_k^{\circ} \subseteq S^{\circ}$ ,  $k \in [1, L_k]$ , где  $L_k$  – число контролируемых переменных, фактическое отклонение текущих значений  $s_{ki}^{\circ}$  которых выходят за пределы допустимых отклонений  $[\varepsilon_{sl}^-, \varepsilon_{sl}^+]$  для этого сценария, а также подмножество параметров  $\{r_{ij}\}$ ,  $j = 1 \dots J_k$ , соответствующих наблюдаемым значениям контролируемым переменным  $S_k^{\circ}$ ;

- оценки величин расчетных параметров ФЭ в процессе эксплуатации на основе наблюдаемых значений контролируемых перемен-

ных  $S_a^{\circ}$  с известной точностью их измерения:  $\{\delta_{sl}\} \rightarrow \{\delta_{rj}\}$ ,  $j = 1 \dots J_a$ ;

- определение функциональных элементов, дефект в которых привел к отказу системы в целом. Результатом решения этой задачи будет подмножество  $\{r_{ij}\}$ ,  $l = 1 \dots L_k$ ,  $j = 1 \dots J_a$ , где  $J_a$  – число параметров, фактические отклонения текущих значений  $r_{ij}$  которых выходят за пределы  $[\varepsilon_{rl}^-, \varepsilon_{rl}^+]$  для этого сценария.

Для решения каждой из вышеперечисленных задач разработаны соответствующие методы решения [5]:

- метод определения подсистем АС, возникновения дефектов в которых могут привести к отказу системы в целом;

- метод поиска интервалов допустимых значений контролируемых переменных, соответствующих рабочему состоянию объекта диагностирования;

- метод оценки величин расчетных параметров функциональных элементов во время эксплуатации на основе значений наблюдаемых контролируемых переменных.

Эти методы реализованы в информационной технологии поддержки принятия решений при диагностировании технического состояния авиационных систем в условиях неопределенности входных данных.

## 2. Интеллектуальная информационная технология (ИИТ) поддержки принятия решений при диагностировании технического состояния авиационных систем

Предложена прикладная ИИТ, которая основана на применении комплекса систем поддержки принятия решений (СППР) при диагностировании технического состояния авиационных систем, включающего компьютерные интерактивные СППР «Diagnosis\_Tree», «PNN\_Modify» и «Motor\_Pro®».

На рис. 1 показана системная функциональная модель процесса диагностирования АС. Данная модель представляет взаимосвязь между входными данными, разработанными моделями и методами, используемыми для обработки этих данных, выходными данными, получаемыми в процессе диагностирования состояния АС.

ИИТ включает ряд следующих этапов.

Этап 1. Определение возможных сценариев отказов АС в целом и их количества. Для решения данной задачи используется компьютерная СППР «Diagnosis\_Tree», с помощью которой эксперт строит дерево отказов АС. Далее строятся деревья событий. На основе анализа деревьев отказов и событий определяется количество наиболее вероятных сценариев отказов.

Этап 2. Определение интервалов допустимых значений контролируемых переменных, соответствующих исправному техническому состоянию турбореактивного двигателя, в условиях неопределенности входных данных для каждого из выявленных сценариев работы с помощью компьютерной СППР «Motor\_Pro®».

Этап 3. Формирование базы данных, включающей выборки значений контролируемых переменных, соответствующих возможным сценариям отказов АС; интервалы значений контролируемых переменных, соответствующие исправному техническому состоянию АС, для каждого из сценариев работы.



Рис. 1. Системная функциональная модель процесса диагностирования АС

Этап 4. В процессе эксплуатации на основе данных мониторинга определяем значения наблюдаемых контролируемых переменных, которые передаются в СППР «PNN\_Modify». С помощью метода, реализованного в данной СППР, устанавливается, в каком техническом состоянии находится АС в текущий момент (определение наиболее вероятного сценария отказа).

Этап 5. Расчет параметров подсистем и функциональных элементов АС на основе наблюдаемых контролируемых переменных для определенного этапа 4 сценария отказов с помощью компьютерной СППР «Motor\_Pro®».

Этап 6. Результаты диагностирования сохраняются на бортовом компьютере, отображаются на элементах бортовой АСКД и передаются оператору наземной службы контроля и диагностики АС.

На основе полученных данных с учетом полетной информации принимается решение о сохранении текущей, либо о переходе к аварийной программе регулирования АС.

### 3. Методика синтеза множества контролируемых переменных для диагностирования турбореактивных двигателей

Пусть задана математическая модель объекта диагностирования (турбореактивного двигателя) и точность измерения возможных контролируемых переменных его состояния. Требуется определить подмножество контролируемых переменных состояния, чтобы обеспечить необходимую вероятность диагностирования – ошибка 3-го рода не должна превышать заданной величины:  $Q < \alpha$ .

Предлагаемая методика включает следующие этапы:

- сформировать множество информативных (значимых) переменных состояния;
- выделить подмножество контролируемых переменных состояния;
- сформировать для рассматриваемых состояний (сценариев отказов) обучающие выборки контролируемых переменных состояния;

– определить репрезентативность обучающих выборок на основе t-статистик Стьюдента;

– используя метод классификации определить вероятности диагностирования состояний турбореактивного двигателя.

Если полученная минимальная вероятность меньше требуемой – добавляем еще одну контролируемую переменную состояния и возвращаемся к пункту 3.

Покажем, что совместное использование методов допускового контроля и классификации состояния приводит к уменьшению ошибок 3-его рода.

Пусть  $S^*$  – значения контролируемых переменных,  $[\varepsilon_{S_m}^-, \varepsilon_{S_m}^+]$  – пределы допустимых отклонений для  $S^*$ ,  $R_m$  – состояние объекта диагностирования (сценарий отказа).

Апостериорная вероятность диагностирования m-го сценария при значениях контролируемых переменных  $S^*$ , определяется согласно формуле Байеса:

$$P(R_m | S^*) = \frac{P(S^* | R_m)P(R_m)}{\sum_m [P(S^* | R_m)P(R_m)]} \quad (1)$$

Определим вероятность произведения нескольких совместных событий:

$$P(S^*, \varepsilon_{S_m}, R_m) = P(R_m)P(S^* | R_m)P(\varepsilon_{S_m} | S^*, R_m) \quad (2)$$

или

$$P(S^*, \varepsilon_{S_m}, R_m) = P(S^*)P(\varepsilon_{S_m} | S^*)P(R_m | S^*, \varepsilon_{S_m}) \quad (3)$$

Апостериорная вероятность диагностирования m-го сценария при значениях контролируемых переменных  $S^*$ , при том, что они выходят за пределы допустимых отклонений  $[\varepsilon_{S_m}^-, \varepsilon_{S_m}^+]$ , определяется из совместного рассмотрения соотношений (2) и (3) по формуле:

$$P(R_m | S^*, \varepsilon_{S_m}) = \frac{P(R_m)P(S^* | R_m)P(\varepsilon_{S_m} | S^*, R_m)}{P(S^*)P(\varepsilon_{S_m} | S^*)} \quad (4)$$

Оценим условные вероятности в выражении (4). В случае использования только методов допускового контроля –

$$P(\varepsilon_{S_m} | S^*, R_m) = P(\varepsilon_{S_m} | S^*) = \frac{1}{M},$$

при совместном использовании методов допускового контроля и классификации состояния –

$$P(\varepsilon_{S_m} | S^*, R_m) = \frac{C}{M}, C > 1.$$

Оценим отношение апостериорных вероятностей –

$$\frac{P(R_m | S^*, \varepsilon_{S_m})}{P(R_m | S^*)} = \frac{P(\varepsilon_{S_m} | S^*, R_m)}{P(\varepsilon_{S_m} | S^*)} = C > 1.$$

Таким образом, совместное использование методов допускового контроля и классификации состояния приводит при диагностировании состояния АС к уменьшению ошибок 3-его рода:

$$Q = 1 - P(R_m | S^*, \varepsilon_{S_m}) = 1 - P(R_m | S^*) \rightarrow 0.$$

Рассмотрим применение предложенной методики для определения множества контролируемых переменных при диагностировании технического состояния турбореактивного двухконтурного двигателя (ТРДД) типа Д-36 в условиях неопределенности входных данных.

На первом этапе из множества информативных переменных в качестве контролируемых переменных (при заданной программе регулирования:  $m = \text{const}$ ,  $\pi_{\text{ВЛ}} = \text{const}$ ,  $\pi_I = \text{const}$ ,  $T_T = \text{const}$ ) были выбраны расход топлива и давление за турбиной среднего давления.

Выделено восемь технических состояний двигателя, вызываемых дефектами подсистем. На втором этапе были сгенерированы обучающие выборки для каждого возможного состояния ТРДД.

На третьем этапе было определено, что полученные выборки нерепрезентативны, т.к. минимальное значение t-статистики Стьюдента получено 1.68 при критическом значении 2.66.

Далее была введена дополнительная контролируемая переменная – датчик давления за турбиной вентилятора.

В случае трех контролируемых переменных были проведены аналогичные расчеты. Минимальное значение t-статистики Стьюдента получено 3.12. Следовательно, обучающие выборки для трех переменных репрезентативны. Таким образом вероятность ошибок диагностирования 3-его рода была уменьшена до уровня 22%.

### Заключение

Предложена прикладная ИИТ диагностика АС в условиях неопределенности входных данных, которая обеспечивает возможность выявления единичных и множественных отказов на основе избыточности

информации о техническом состоянии в процессе диагностирования за счет совместного использования методов допускового контроля и классификации состояния с использованием данных мониторинга.

Разработан метод синтеза множества контролируемых переменных для диагностирования единичных и множественных отказов турбореактивных двигателей в условиях неопределенности входных данных. Результатом синтеза являются множество контролируемых переменных и необходимая точность их измерения.

В качестве примера, для ТРДД типа Д-36 выявлено, что для снижения ошибки 3-его рода до уровня ниже 30% необходимо добавить дополнительную контролируемую переменную – датчик давления за турбиной вентилятора.

#### Литература

1. Попов А.В. Исследование динамических характеристик ТРДД с перемежающимися неисправностями проточной части на установившихся режимах его работы [Текст] /

А. В. Попов // *Авиационно-космическая техника и технология*. – 2007. – № 2 (38). – С. 63–67.

2. Биргер И.А. *Техническая диагностика* [Текст] / И.А. Биргер. – М.: Машиностроение, 1978. – 240 с.

3. Ахмедзянов А.М. *Диагностика состояния ВРД по термодинамическим параметрам*. [Текст] / А.М. Ахмедзянов, Н.Г. Дубровский, А.П. Тунаков. – М.: Машиностроение, 1983. – 206 с.

4. Donald L. Simon. *A Systematic Approach to Sensor Selection for Aircraft Engine Health Estimation* [Text] / Simon L. Donald, Sanjay Garg // NASA/TM–2009-215839. – 11p.

5. Стрелец В.Е. *Методология решения задачи диагностирования технического состояния газотурбинных двигателей в условиях неопределенности входных данных* [Текст] / В.Е. Стрелец, М.Л. Угрюмов, И.А. Трофимова, С.А. Вамболь // *Авиационно-космическая техника и технология*. – 2014. – № 9 (116). – С. 121-127.

*Поступила в редакцию 30.05.2015*

#### **В.Є. Стрілець, М.Л. Угрюмов, К.М. Угрюмова, І.О. Трофімова. Метод синтезу множини змінних, що контролюються, для діагностування відмов турбореактивних двигунів в умовах невизначеності вхідних даних**

*Розроблено метод синтезу множини змінних стану, що контролюються, для діагностування одиничних та множинних відмов турбореактивних двигунів з урахуванням стохастичної природи вхідних даних, за умовою, що помилка класифікації стану не перевищує заданого значення.*

*Поданий приклад застосування описаного методу для визначення множини змінних, що контролюються, при діагностуванні технічного стану турбореактивного двоконтурного двигуна типу Д-36.*

**Ключові слова:** турбореактивний двигун, діагностування технічного стану, контрольовані змінні, невизначеність вхідних даних.

#### **V.Ye. Strilets, M.L. Ugryumov, K.M. Ugryumova, I.O. Trofimova. Method of controlled variables set synthesis for faults diagnostic of turbojet engine under input data uncertainty**

*The method of state controlled variables synthesis for single and multiple faults diagnostics was developed. This method takes into account the stochastic nature of input data. The diagnosis is carried out with condition that the classification error is not better than given value.*

*The example of the defined method application was offered for the controlled variables set determination when diagnostics the turbojet bypass engine (model D-36) technical state.*

**Keywords:** turbojet engine, technical state diagnostic, controlled variables, input data uncertainty.