

УДК 621.452.3.046.8.02:681.518.54

doi: 10.32620/aktt.2021.4sup1.22

И. В. ОГАНЯН<sup>1,2</sup>, С. В. ЕПИФАНОВ<sup>2</sup><sup>1</sup> АО «ФЭД», Харьков, Украина<sup>2</sup> Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского «Харьковский авиационный институт», Харьков, Украина

## АЛГОРИТМ КЛАССИФИКАЦИИ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ТОПЛИВНОГО РЕГУЛЯТОРА В ПРОСТРАНСТВЕ ПАРАМЕТРОВ РАБОЧЕГО ПРОЦЕССА

В данной статье решается задача формирования алгоритма классификации технического состояния топливного регулятора турбовального двигателя вертолета в пространстве параметров рабочего процесса регулятора и получения оценок состояния исследуемого изделия. Рассмотрены основные методы классификации технического состояния, а также приведено краткое обоснование применения метода классификации состояния изделия в пространстве измеряемых параметров для построения рассматриваемого в этой статье алгоритма. Определены критерии наличия неисправности в исследуемом регуляторе и сформированы основные требования к алгоритму классификации. С целью упрощения решаемой задачи принят ряд допущений о диагностируемых дефектах. Описаны все основные составляющие алгоритма классификации. Приведены сведения о математической модели топливного регулятора. Выбраны режим работы регулятора для анализа и необходимые для диагностирования параметры состояния, а также диагностические параметры рабочего процесса. Описана методика линеаризации математической модели регулятора и методика формирования матрицы коэффициентов влияния, которая является базовым элементом алгоритма. Определена вероятностная характеристика достоверности алгоритма классификации, а также приведен вывод формулы для ее расчета, основанный на теореме Байеса. Чтобы оценить качество классификации алгоритмом диагностирования, сформирована тестовая выборка параметров рабочего процесса. Изложена методология построения тестовой выборки и определен ее размер. После получения алгоритмом классификации оценок состояния изделия по данным тестовой выборки, рассчитан такой критерий качества, как полнота классификации. В результате оценки полноты классификации сформирована таблица со значениями этого критерия для каждого класса. Полнота классификации алгоритма в среднем для всех дефектов составила 89 %. В выводах указаны возможные методы повышения качества диагностирования при использовании разработанного алгоритма.

**Ключевые слова:** топливный регулятор; диагностика; классификация; дефект; математическая модель; параметры состояния; диагностические признаки; вероятностные характеристики достоверности; качество классификации; полнота классификации.

### Введение

В настоящее время в машиностроении растет потребность в диагностировании технического состояния выпускаемой продукции на разных этапах ее жизненного цикла. Это связано с необходимостью выпускать качественную продукцию в кратчайшие сроки в условиях постоянно возрастающей технической сложности новых изделий, увеличения объема продукции и сокращения времени на выполнение контрактов. Применяемые методы диагностирования существенно зависят от вида диагностируемых изделий, а также от состава наиболее часто встречаемых дефектов. В данной работе рассматривается алгоритм диагностирования технического состояния гидромеханического топливного регулятора турбовального двигателя. Необходимость ис-

следования состояния этого агрегата связана с частым выявлением в эксплуатации несоответствий измеряемых параметров регулятора требованиям технических условий. Эти несоответствия могут быть причиной отказов изделий в полёте. Возникновение несоответствий связано с отклонениями конструктивных параметров элементов регулятора (например, диаметра дросселя или жесткости пружины) от исправного исходного состояния или от значений, соответствующих техническим требованиям. Методы локализации дефектов по измеренным параметрам рабочего процесса можно разделить на две основные группы параметрических методов:

- методы, основанные на параметрической идентификации математических моделей;
- методы классификации состояний изделия в

пространстве измеряемых параметров.

Применение методов, основанных на параметрической идентификации, к диагностированию технического состояния исследуемого топливного регулятора затруднено из-за особенностей его конструкции и технологии испытаний. Основная трудность диагностирования заключается в ограниченном количестве доступных для измерения параметров рабочего процесса. Отсутствие полной информации о рабочих процессах, происходящих в регуляторе, не позволяет идентифицировать все необходимые параметры состояния математической модели.

Рассматриваемый в данной работе алгоритм диагностирования технического состояния топливного регулятора относится к методам классификации состояния в пространстве измеряемых параметров [1]. Методика заключается в классифицировании неисправного состояния изделия по измеренным диагностическим параметрам из множества диагностических признаков, сформированных в выборку с четким разделением данных на классы дефектов. Классы формируются путем группирования параметров рабочего процесса, значения которых рассчитаны с помощью математической модели регулятора с искусственным отклонением определенных параметров состояния для имитации соответствующих дефектов. Количество дефектов, доступных для диагностирования, ограничено глубиной моделирования, количеством и составом измеряемых диагностических параметров рабочего процесса.

Существуют также варианты реализации алгоритма диагностирования [6], в которых классификация состояния исследуемого изделия осуществляется из выборки диагностических параметров, полученных в процессе натурных экспериментов. Однако, ввиду того, что на практике дефекты имеют случайный несистемный характер возникновения, формирование выборок данных натурных экспериментов является крайне трудоемкой задачей и в этой работе не рассматривается.

В данной статье решается задача построения алгоритма классификации технического состояния в пространстве параметров рабочего процесса регулятора и получения оценок состояния исследуемого изделия. Проведены описания всех основных составляющих алгоритма классификации. Выбран анализируемый режим работы регулятора, состав необходимых для диагностирования параметров состояния и диагностических параметров рабочего процесса. Описана методика линеаризации математической модели регулятора и методика построения матрицы коэффициентов влияния, которая является базовым элементом всего алгоритма. Определена

вероятностная характеристика достоверности алгоритма классификации, а также получена формула для ее расчета, основанная на теореме Байеса. Чтобы оценить качество определения апостериорной вероятности состояний, сформирована тестовая выборка параметров рабочего процесса и для каждого заданного состояния рассчитаны соответствующие частоты получения всех возможных диагнозов. В результате сформирована матрица частот диагнозов. Оценка средней вероятности правильной классификации для всех дефектов составила 89 %.

## 1. Постановка задачи

Признаком наличия неисправности топливного регулятора является отклонение измеряемого параметра рабочего процесса от установленного в технических условиях значения на определенном режиме работы. Отклонение параметра состояния регулятора от исходного значения свидетельствует о развитии неисправности, однако при малом отклонении этого параметра исследуемое изделие может оставаться в исправном состоянии. Со временем дефект может развиваться и приводить к неисправности. В данной статье динамика развития неисправности не рассматривается, а лишь анализируется процесс оценивания состояния объекта по результатам измерения его параметров рабочего процесса в заданный момент времени или в течение заданного периода времени, за который состояние объекта и параметры состояния изменяются незначительно.

На рис. 1 изображено изменение состояний  $S_1, S_2, \dots, S_q$  регулятора в пространстве двух параметров рабочего процесса. Каждый дефект характеризуется кривой ОИН, которая отображает траекторию его развития. Здесь точка  $O$ , в которой данные кривые берут начало, – это исходное исправное состояние регулятора. Точка  $I_j$  отображает границу исправного состояния регулятора в пределах развития  $j$ -го дефекта. Поверхность, на которой расположены точки  $I_1, I_2, \dots, I_q$ , разделяет множество исправных и неисправных состояний регулятора. Так, для исследуемого регулятора режим работы, на котором отклонение массового расхода топлива составляет более чем 1,5 %, считается неисправным состоянием. Поверхность, на которой расположены точки  $H_1, H_2, \dots, H_q$ , отображает границу работоспособного состояния. Из опыта эксплуатации регулятора известно, что изменение параметров рабочего процесса более чем на 10 % ведет к потере работоспособности системы автоматического управления (САУ), в состав которой входит регулятор. При потере регулятором работоспособности, запуск САУ

для снятия параметров рабочего процесса с целью последующего их анализа чреват полной поломкой исследуемого регулятора. Поэтому в процессах производства и эксплуатации наиболее востребованной является диагностика состояния регулятора от момента достижения им неисправного состояния до момента достижения неработоспособного состояния.

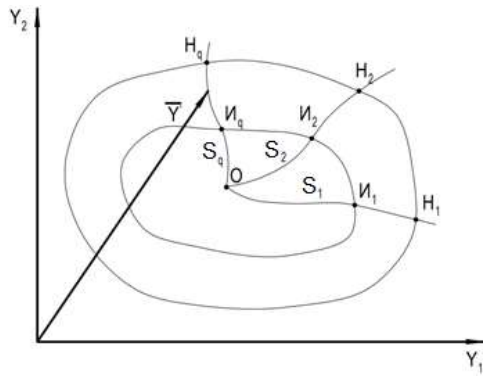


Рис. 1. Представление состояний регулятора в пространстве двух параметров рабочего процесса

Таким образом, задача формирования алгоритма диагностирования заключается в разработке алгоритма, способного диагностировать множество неисправных состояний регулятора, заключенных между поверхностями  $I_1, I_2, \dots, I_q$  и  $H_1, H_2, \dots, H_q$ . Для решения этой задачи следует определить, к какому из дефектов (состояний)  $S_1, S_2, \dots, S_q$  относится текущее состояние регулятора  $S$ , информация о котором содержится в векторе измеряемых параметров рабочего процесса  $\bar{Y}^*$ . Текущее состояние объекта  $S$  относится к определенному классу дефекта с вероятностью диагнозов  $P(D_1|\bar{Y}^*), P(D_2|\bar{Y}^*), \dots, P(D_q|\bar{Y}^*)$  [2]. Обработка информации алгоритмом диагностирования состоит из двух этапов. На первом этапе рассчитываются апостериорные вероятности  $P(D_1|\bar{Y}^*), P(D_2|\bar{Y}^*), P(D_q|\bar{Y}^*)$  наличия дефектов  $D_j$  при условии, что в результате измерений получено значение вектора параметров рабочего процесса  $\bar{Y}^*$ . На втором этапе выполняется анализ полученных значений вероятностей с целью формирования диагноза – принятия решения о наличии одного из возможных состояний. В данной работе второй этап не рассматривается. Он является объектом отдельного исследования, так как при значительных корреляциях между состояниями рассматриваемые апостериорные вероят-

ности могут быть близки между собою, поэтому одной из важных задач формирования алгоритма является обоснование пороговых значений вероятностей, используемых при принятии решения. Основным объектом данного исследования являются значения апостериорных вероятностей, получение которых обеспечивает изложенная выше методика, в частности, вероятностей правильного диагностирования  $P(D_j/S_j)$ . Если эти вероятности велики, то это дает основание для применения самой простой реализации второго из рассмотренных выше этапов: в качестве диагноза принимается состояние с максимальной апостериорной вероятностью.

С целью упрощения решаемой задачи был принят ряд допущений. Рассмотрено применение алгоритма диагностирования на одном режиме работы регулятора. Каждый из классифицируемых дефектов связан с отклонением одного параметра состояния, а отклонения параметров рабочего процесса, характеризующие данный дефект, неизменны во времени. Такое допущение незначительно влияет на практическую значимость рассматриваемого алгоритма, поскольку количество требований нормативной документации, определяющей область работоспособности, к рабочему процессу на стационарных режимах работы гораздо больше количества требований на динамических режимах работы. Также с целью упрощения принято, что события, приводящие к дефектам – независимые.

## 2. Описание математической модели регулятора

Математическая модель регулятора является нелинейной динамической моделью, состоящей из системы дифференциально-алгебраических уравнений [3]. Гидромеханическая динамическая математическая модель исследуемого регулятора состоит из 56 основных параметров состояния (входных параметров), таких как жесткость и предварительная затяжка пружин, проходные сечения дросселей и площадей поршней гидроцилиндров. Результатом решения уравнений математической модели являются значения 90 расчетных параметров рабочего процесса (диагностических признаков), таких как расходы топлива, давления топлива, перемещения и скорости перемещения гидроцилиндров. Принципиальная схема моделируемого топливного регулятора представлена на рис. 2 [3]. Гидравлическая система, изображенная на рис. 2, состоит из насоса, клапана постоянного перепада КПП, основной дозирующей иглы (ОДИ), сервопоршня, который перемещает ОДИ, и четырех регуляторов, каждый из которых формирует управляющее давление  $P_{упр}$  на сервопоршне пропорционально отклонению соответству-

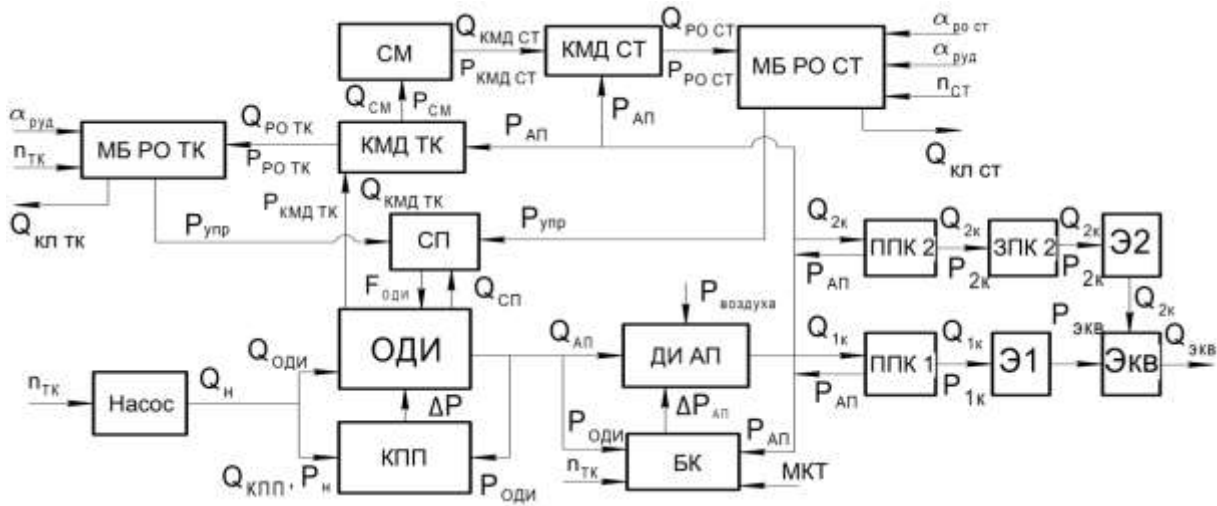


Рис. 2. Принципіальна схема досліджуваного паливного регулятора

ющого регульованого параметра від заданого значення (МБ РО СТ, МБ РО ТК) і пропорційно регульованому параметру (БК):

МБ РО СТ – механічний блок регулятора оборотів вільної турбіни – формує  $P_{упр}$  пропорційно відхиленню частоти обертання ротора вільної турбіни двигача від заданого значення;

МБ РО ТК – механічний блок регулятора оборотів турбокомпресора – формує  $P_{упр}$  пропорційно відхиленню частоти обертання ротора турбокомпресора двигача від заданого значення;

БК – блок клапанів автомата прийнятності, формуючий  $P_{упр}$  пропорційно частоті обертання ротора турбокомпресора двигача .

СМ – дросель синхронізатора потужності двох двигачей, в даній математическій моделі має постійне сечення.

Площа проходного сечення ОДИ і перепад тиску на КПП формують витрату палива  $Q_{ЭКВ}$  на виході з регулятора. Підпорний клапан першого контура форсунок ППК 1, клапан відкриття другого контура форсунок ППК 2, запірний клапан другого контура ЗПК 2, дроселі Э1, Э2, ЭКВ розподіляють течію рідини по двом гідроліческім каналам і формують підпорні тиску  $P_{1к}$ ,  $P_{2к}$  в гідроліческій системі.

С целью отладки работы алгоритма и оценки качества диагностирования необходимо определить режим работы регулятора, для которого будет производиться анализ состояния. Исходя из поставленной задачи, выбран самый продолжительный для САУ вертолета режим работы регулятора вольной турбіни.

Для реалізації алгоритму діагностування, улічывая аналізуємый режим роботи регулятора, було вибрано 10 параметрів стану. При виборі параметрів стану улічувалась кореляція між коефіцієнтами впливу параметрів стану, представлених далі в розділі 3. В итоге були вибрані параметри стану, які мають найменші кореляційні залежності коефіцієнтів впливу, що удічуєть спосіб алгоритму визначати границі між класами. При виборі вимірюємых параметрів робочого процесу розглядалися тільки ті параметри, які доступні для вимірювання, що зв'язано з конструктивними особливостями регулятора. Общє кількість вимірюємых параметрів робочого процесу рівняєть 12. В їх склад входять витрату палива на виході з регулятора  $Q_{ЭКВ}$  і тиску в різних його полостях. Для розглядуємого режиму роботи регулятора вольной турбіни несправне і нероботоспособне стану изделия визначаєть по відхиленню витрати палива  $Q_{ЭКВ}$  від значення, визначеного в техніческіх умовях на регулятор. Список параметрів стану, для відхилєний котрих сформировані класи дефектів, приведен в таблиці 1, де використані слєдуєтьчі обозначєния:

$F_{СМ}$  – площа проходного сечення дроселю регулятора синхронізатора потужності,  $m^2$ ;

$F_{Э1}$  – площа проходного сечення дроселю Э1 першого контура форсунок,  $m^2$ ;

$F_{ЭКВ}$  – площа проходного сечення еквівалєнтного дроселю ЭКВ,  $m^2$ ;

$k_{КПП}$  – жєсткость пружини клапана постійного перепада,  $H/m$ ;

$k_{ППК1}$  – жєсткость пружини підпорного клапана першого контура,  $H/m$ ;

Таблиця 1

Перечень диагностируемых параметров состояний

Обозначение класса дефекта	S <sub>1</sub>	S <sub>2</sub>	S <sub>3</sub>	S <sub>4</sub>	S <sub>5</sub>
Обозначение параметра состояния	F <sub>СМ</sub>	F <sub>Э1</sub>	F <sub>ЭКВ</sub>	k <sub>КПП</sub>	k <sub>ППК1</sub>
Обозначение класса дефекта	S <sub>6</sub>	S <sub>7</sub>	S <sub>8</sub>	S <sub>9</sub>	S <sub>10</sub>
Обозначение параметра состояния	k <sub>ППК2</sub>	k <sub>ЗПК2</sub>	F <sub>БК</sub>	F <sub>РО СТ</sub>	X <sub>ЗРО СТ</sub>

k<sub>ППК2</sub> – жесткость пружины подпорного клапана второго контура, Н/м;

k<sub>ЗПК2</sub> – жесткость пружины запорного клапана второго контура, Н/м;

F<sub>БК</sub> – площадь проходного сечения входного дросселя блока клапанов регулятора автомата приемистости, м<sup>2</sup>;

F<sub>РО СТ</sub> – постоянная площадь проходного сечения клапана регулятора свободной турбины, м<sup>2</sup>;

X<sub>ЗРО СТ</sub> – предварительная затяжка пружины механического блока регулятора свободной турбины, м.

Список параметров рабочего процесса приведен в таблице 2.

### 3. Линейная математическая модель топливного регулятора. Матрица коэффициентов влияния

Для упрощения использования математической модели в целях диагностики, а именно ускорения работы алгоритма диагностики путем значительного сокращения математических операций, необходимых для решения математической модели, а также удобства имплементации алгоритма на различных платформах, данную модель необходимо линеаризовать. Формирование линейной модели происходит путем построения матрицы коэффициентов влияния параметров состояния  $\theta$  на расчетные параметры рабочего процесса  $Y$  [4]. Элементы матрицы коэффициентов влияния (МКВ) определяют степень влияния отклонения каждого параметра состояния на расчетные параметры  $Y$  и рассчитываются путем решения математической модели с заданным поочередным отклонением параметров состояния от исходного значения. Параметры состояния изменяются с одинаковым масштабом двухсторонней вариации  $\alpha$ . Для данного алгоритма коэффициент вариации  $\alpha$  равен 0,02.

Таблиця 2

Перечень диагностических признаков

Обозначение параметра рабочего процесса	Описание параметра рабочего процесса
Q <sub>ЭКВ</sub>	Объёмный расход топлива на выходе из регулятора, м <sup>3</sup> /с
P <sub>1к</sub>	Давление топлива на выходе из подпорного клапана первого контура, Па
P <sub>2к</sub>	Давление топлива на выходе из запорного клапана второго контура, Па
P <sub>АП</sub>	Давление топлива за дозирующей иглой автомата приемистости, Па
P <sub>ОДИ</sub>	Давление топлива за основной дозирующей иглой, Па
P <sub>Н</sub>	Давление топлива за насосом, Па
P <sub>БК</sub>	Давление топлива, управляемое блоком клапанов автомата приемистости, Па
P <sub>п-тк</sub>	Давление топлива, пропорциональное квадрату частоты вращения привода ротора турбокомпрессора, подведенное к блоку клапанов автомата приемистости, Па
P <sub>упр</sub>	Давление топлива управления в полости сервопоршня, Па
P <sub>СМ</sub>	Давление топлива перед дросселем регулятора синхронизатора мощности, Па
P <sub>КМДСТ</sub>	Давление топлива за дросселем регулятора синхронизатора мощности, Па
P <sub>КПД</sub>	Давление топлива на выходе из клапана постоянного давления, Па

Элементы МКВ рассчитываются следующим образом:

$$N_{ij} = \frac{Y_i^+ - Y_i^-}{\theta_i^+ - \theta_i^-} \cdot \frac{Y_{0i}}{Y_{0i}}, \quad (1)$$

где  $N_{ij}$  – коэффициент влияния МКВ отклонения  $j$ -го параметра состояния на  $i$ -й параметр рабочего процесса;  $Y_i^+$  – значение параметра рабочего процесса, рассчитанного по математической модели с отклонением параметра состояния в положительную сторону;  $Y_i^-$  – значение параметра рабочего процесса, рассчитанного по математической модели с отклонением параметра состояния в отрицательную сторону;  $Y_{0i}$  – исходное значение параметра рабо-

чего процесса.  $\theta_j^+ = (1 + \alpha)\theta_{0j}$  – положительное отклонение параметра состояния от его исходного значения  $\theta_{0j}$ ,  $\theta_j^- = (1 - \alpha)\theta_{0j}$  – отрицательное отклонения параметра состояния от его исходного значения. Подставив данные определения в формулу (1), получим:

$$H_{ij} = \frac{Y_i^+ - Y_i^-}{2Y_{0i}\alpha}. \quad (2)$$

Так как линеаризованная модель оперирует параметрами состояния в относительных величинах, то параметры рабочего процесса также необходимо перевести в относительную систему координат:

$$Z_i = \frac{Y_i - Y_{0i}}{Y_{0i}}, \quad (3)$$

где  $Z_i$  – относительное отклонение  $i$ -го параметра рабочего процесса от его начального значения. Относительные отклонения измеряемых параметров рабочего процесса  $Z$  являются диагностическими признаками регулятора.

#### 4. Описание алгоритма классификации состояния топливного регулятора

В рассматриваемом алгоритме классификации состояния регулятора применяются вероятностные характеристики достоверности. Основным показателем достоверности алгоритма является условная вероятность  $P(D_j | \bar{Z}^*)$ , которая определяет вероятность диагноза  $D_j$ , то есть наличия дефекта, относящегося к классу  $S_j$ , при измерении вектора диагностических признаков  $\bar{Z}^*$ . Данная вероятность определяются по формуле Байеса (4).

$$P(D_j | \bar{Z}^*) = \frac{P(\bar{Z}^* | S_j) \cdot P(S_j)}{\sum_{j=1}^q P(\bar{Z}^* | S_j) \cdot P(S_j)}, \quad (4)$$

где  $P(S_j)$  – это априорная вероятность возникновения дефекта  $S_j$ ,  $q$  – количество диагностируемых дефектов. В случае, если дефекты равновероятны,

$$P(S_j) = \frac{1}{q}; \quad (5)$$

$P(\bar{Z}^* | S_j)$  – апостериорная вероятность, которая показывает вероятность измерения вектора признаков  $\bar{Z}^*$  при наличии дефекта  $S_j$ . Вероятность  $P(\bar{Z}^* | S_j)$  является следствием двух независимых

событий: реализации истинного значения вектора признаков  $\bar{Z}$  при наличии дефекта  $S_j$ , и получения измеренного значения  $\bar{Z}^*$  при известном его истинном значении  $\bar{Z}$ . Учитывая данную последовательность событий, получим:

$$P(\bar{Z}^* | S_j) = P(\bar{Z} | S_j) \cdot P(\bar{Z}^* | \bar{Z}). \quad (6)$$

Значение компонент вектора истинных диагностических признаков  $Z_i$  определяется с помощью линейной математической модели как произведение коэффициента МКВ  $H_{ij}$  на отклонение параметра состояния, характеризующее определенный дефект  $S_j$ :

$$Z_i = H_{ij} \cdot \delta\theta_j, \quad (7)$$

где  $\delta\theta_j$  – относительное отклонение параметра состояния от исходного значения  $\theta_{0j}$ . В данном алгоритме для расчета вектора  $\bar{Z}$  принято относительное отклонение параметра состояния в положительную сторону, равное 2 %.

Чтобы оценить вероятности, указанные в формуле (6), необходимо сначала определить соответствующие функции плотностей распределения вероятностей, после чего проинтегрировать в определенном диапазоне. Тогда апостериорная вероятность  $P(\bar{Z}^* | S_j)$  будет равна

$$P(\bar{Z}^* | S_j) = \int_{\Omega_j} f(\bar{Z}^* | S_j) d\Omega_j = \int_{\Omega_j} f(\bar{Z}^* | \bar{Z}) \cdot f(\bar{Z} | S_j) d\Omega_j, \quad (8)$$

где  $f(\bar{Z}^* | \bar{Z})$  – плотность распределения вероятности  $P(\bar{Z}^* | \bar{Z})$ ;

$f(\bar{Z} | S_j)$  – плотность распределения вероятности  $P(\bar{Z} | S_j)$ ;

$\Omega_j$  – область интегрирования для определенного дефекта  $S_j$ .

За неимением более детальной информации о дефектах, в качестве допущения было принято, что распределение значений вектора истинных диагностических признаков  $\bar{Z}$  по мере развития дефекта  $S_j$  – равномерное, а распределения значений компонент вектора измеренных диагностических признаков  $\bar{Z}^*$  – нормальное. Поскольку значения вектора  $\bar{Z}^*$  имеют разный порядок, то для корректной работы алгоритма диагностирования, а также для удобства его построения, необходимо нормализовать значения вектора измерений  $\bar{Z}^*$  и вектора

истинных значений  $\vec{Z}$ , разделив каждое относительное отклонение параметра рабочего процесса на соответствующее безразмерное среднее квадратическое отклонение  $\sigma_{бр i}$ .

$$Z_i = \delta Y_i = \frac{Y_i - Y_{0i}}{\sigma_{бр i}} ; \tag{9}$$

$$\sigma_{бр i} = \frac{\sigma_i}{Y_{0i}} . \tag{10}$$

Значения среднее квадратических отклонений  $\sigma_i$  (СКО) взяты из технической документации на измерительные устройства и указаны в таблице 3.

Таблица 3  
Значения СКО измеряемых параметров

СКО объемного расхода топлива, м <sup>3</sup> /с	СКО давления топлива, Па
5.5555e-7	16887

После нормализации дисперсия значений вектора  $\vec{Z}^*$  и вектора  $\vec{Z}$  равна единице, а нормальное распределение примет вид:

$$f(\vec{Z}^*|\vec{Z}) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\sum (z_i^* - z_i)^2 / 2} . \tag{11}$$

Для расчета функции распределения  $f(\vec{Z}|S_j)$  на рис. 3 представлена схема расположения вектора измеренных диагностических признаков  $\vec{Z}^*$  и вектора истинных значений диагностических признаков  $\vec{Z}$  при наличии некоторого дефекта  $S_j$  в пространстве двух диагностических признаков  $Z_1$  и  $Z_2$ .

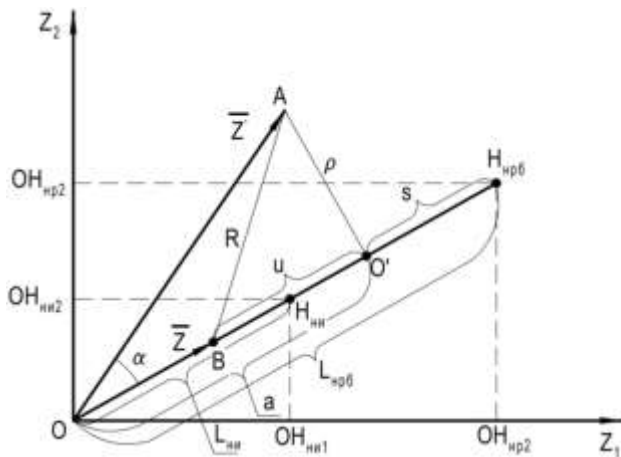


Рис. 3. Схема к расчету плотности распределения вероятности  $f(\vec{Z}^*|S_j)$

Отрезку  $OH_{ни}$  соответствует степень развития дефекта, приводящая изделие в неисправное состояние,  $OH_{ни1}$  и  $OH_{ни2}$  проекции отрезка на оси координат.

Отрезку  $OH_{нр}$  соответствует степень развития дефекта, приводящая изделие в неработоспособное состояние (максимальная рассматриваемая степень развития дефекта), а  $OH_{нр1}$  и  $OH_{нр2}$ , соответственно, проекции его на оси координат.  $OA$  – вектор измеренных диагностических признаков  $\vec{Z}^*$ ,  $OB$  – вектор истинных значений диагностических признаков  $\vec{Z}$  при наличии дефекта  $S_j$ , что соответствует отклонению  $j$ -го параметра состояния на 2 %. Отрезок  $OO'$  – проекция вектора  $OA$  на прямую  $OH_{нр}$ ,  $\alpha$  – угол между векторами  $\vec{Z}$  и  $\vec{Z}^*$ .

Согласно линейной математической модели регулятора, проекция вектора  $OH_{ни}$  на оси координат равна

$$OH_{ни1} = H_{1j} \cdot X_{ни j} ; \tag{12}$$

$$OH_{ни2} = H_{2j} \cdot X_{ни j} ; \tag{13}$$

$$L_{ни} = \sqrt{OH_{ни1}^2 + OH_{ни2}^2} , \tag{14}$$

где  $X_{ни j}$  – отклонение параметра состояния, которое приводит изделие в неисправное состояние,  $L_{ни}$  – норма вектора  $OH_{ни}$ .

Проекция вектора  $OH_{нр}$  на оси координат равна

$$OH_{нр1} = H_{1j} \cdot X_{нр j} ; \tag{15}$$

$$OH_{нр2} = H_{2j} \cdot X_{нр j} ; \tag{16}$$

$$L_{нрб} = \sqrt{OH_{нр1}^2 + OH_{нр2}^2} , \tag{17}$$

где  $X_{нр j}$  – отклонение параметра состояния, которое приводит изделие в неработоспособное состояние,  $L_{нрб}$  – норма вектора  $OH_{нр}$ .

Поскольку задача классификации состояния регулятора  $S$ , рассматриваемая в данной статье, решается в пределах между неисправным состоянием и неработоспособным состоянием изделия, и учитывая предположение о равномерном распределении истинных значений диагностических признаков, плотность распределения вероятности наблюдения истинного значения вектора  $\vec{Z}$  при наличии дефекта  $D_j$  равна

$$f(\vec{Z}|D_j) = \frac{1}{L_{нрб} - L_{ни}} . \tag{18}$$

Далее, чтобы упростить соотношение (11) обозначим  $AOO' = \alpha$ ,  $OO' = a$ ,  $BO' = u$ ,  $AO' = \rho$ ,  $BA = R$ . Выполним следующие геометрические преобразования:

$$\cos(\alpha) = \frac{\vec{Z}^* \cdot \vec{Z}}{\|\vec{Z}^*\| \cdot \|\vec{Z}\|} ; \tag{19}$$

$$a = \left\| \vec{Z}^* \right\| \cos(\alpha); \quad (20)$$

$$\rho = \left\| \vec{Z}^* \right\| \sin(\alpha); \quad (21)$$

$$R^2 = \rho^2 + u^2. \quad (22)$$

Так как  $\Sigma (Z_i^* - Z_i)^2 = \left\| \vec{Z}^* - \vec{Z} \right\|^2 = R^2 = \rho^2 + u^2$ , то формулу (11) можно упростить:

$$f(\vec{Z}^* | \vec{Z}) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\rho^2/2} e^{-u^2/2}. \quad (23)$$

Из формулы (23) видно, что функция распределения плотности вероятности  $f(\vec{Z}^* | \vec{Z})$  при фиксированной величине  $\vec{Z}^*$  зависит только от скаляра  $u$ , который является общей переменной интегрирования для функции плотности распределения  $f(\vec{Z} | D_j)$  и функции  $f(\vec{Z}^* | \vec{Z})$ .

Чтобы определить пределы интегрирования функций плотностей распределения, изначально для каждого дефекта  $S_j$  был рассчитан скаляр  $s_j = L_{нр} - a_j$ . Величина  $s_j$  определяет приближенность текущего состояния изделия  $S$ , характеризующееся вектором измеренных диагностических параметров  $\vec{Z}^*$ , к неработоспособному состоянию изделия  $S_{нр}$  с дефектом  $S_j$ . Также следует учесть, что отклонение параметров состояния,  $a$ , следовательно, и отклонение диагностических параметров может происходить как в положительную, так и в отрицательную сторону. Поэтому границы интегрирования должны иметь абсолютные значения. Таким образом, верхняя граница интегрирования равна  $|L_{нр\ j} - a_j|$ . Тогда нижняя граница интегрирования равна  $-|L_{нр\ j} - s_j| = -|a_j|$ . Поскольку в данной задаче исправные состояния изделия не рассматриваются, то в алгоритм вводится дополнительное условие: если абсолютная величина скаляра  $|a_j|$  меньше скаляра  $L_{ни\ j}$ , то вероятность  $P(\vec{Z}^* | S_j)$  (а следовательно и интеграл функции распределения  $f(\vec{Z}^* | S_j)$ ) приравняется к нулю.

Формула для расчета вероятности  $P(\vec{Z}^* | S_j)$ , после подстановки в нее полученных соотношений для плотности распределения вероятности  $f(\vec{Z} | S_j)$ ,

$f(\vec{Z}^* | \vec{Z})$  и пределов интегрирования примет следующий вид:

$$P(\vec{Z}^* | S_j) = \frac{e^{-\rho^2/2}}{L_{нр\ б} - L_{ни}} \int_{-|a_j|}^{|L_{нр\ б\ j} - a_j|} \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-u^2/2} du \quad (24)$$

$$P(\vec{Z}^* | S_j) = 0, \text{ если } a_j < L_{ни\ j}$$

Подставив соотношения для вероятностей  $P(D_j)$  и  $P(\vec{Z}^* | S_j)$  в выражение (4), получим финальную формулу для определения вероятности  $P(D_j | \vec{Z}^*)$  наличия дефекта  $S_j$ , при измерении вектора диагностических признаков  $\vec{Z}^*$ :

$$P(D_j | \vec{Z}^*) = \frac{\frac{e^{-\rho^2/2}}{q(L_{нр\ б} - L_{ни})} \int_{-|a_j|}^{|L_{нр\ б\ j} - a_j|} \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-u^2/2} du}{\sum_{j=1}^q \frac{e^{-\rho^2/2}}{q(L_{нр\ б} - L_{ни})} \int_{-|a_j|}^{|L_{нр\ б\ j} - a_j|} \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-u^2/2} du} \quad (25)$$

если  $a_j < L_{ни\ j}$ ;

$$P(D_j | \vec{Z}^*) = 0, \text{ если } a_j < L_{ни\ j}.$$

## 5. Формирование тестовой базы данных. Оценка точности алгоритма

Для оценки точности работы алгоритма необходимо проверить его работу на достаточном количестве данных. Поскольку данных реальных экспериментов с заведомо известными дефектными состояниями изделия мало, возникает потребность такую базу данных сформировать с использованием имитационного моделирования.

Тестовая база данных сформирована из информации, полученной в результате множества расчетов диагностических признаков  $\vec{Z}^*$  с помощью линейной математической модели.

Формируемая выборка должна соответствовать известным характеристикам генеральной совокупности; в рассматриваемом случае количество экспериментов должно быть равномерно распределено по мере увеличения отклонения параметра состояния. С этой целью для каждого дефекта диапазон между отклонением параметра состояния, приводящего к неисправности, и отклонением, вызывающим неработоспособное состояние изделия, был разделен на 20 равных частей. Таким образом, выборка, сформированная путем проведения 20 расчетов для каж-



лого дефекта  $S_j$ , имеет равномерное распределение  $f(\vec{Z}|S_j)$ . Чтобы выборка соответствовала нормальному распределению погрешностей измерений  $f(\vec{Z}^*|\vec{Z})$ , для каждого вектора истинных диагностических признаков  $\vec{Z}$  из 20 было сгенерировано по нормальному закону распределения 100 векторов экспериментальных диагностических признаков  $\vec{Z}^*$ , отличающихся от вектора  $\vec{Z}$  на величину, не превышающую значения  $\pm 3\sigma_{бр i}$ . Минимальное количество векторов экспериментальных диагностических признаков  $\vec{Z}^*$  определялось из необходимости подтверждения гипотезы о соответствии сгенерированной выборки распределению с заданными параметрами СКО и математического ожидания. Была выбрана размерность выборки  $n$ , равная 100 элементам. Чтобы определить ошибку выборки, были подсчитаны критерии достоверности среднего  $t_{ср i}$  и критерии достоверности СКО  $t_{ско i}$  для всех выборок диагностических признаков  $Z_i$  по формуле

$$t_{ско i} = \frac{\sigma_{бр i}}{\delta_{ско i}}; t_{ср i} = \frac{\bar{Z}_i}{\delta_{ср i}}, \quad (26)$$

где  $\delta_{ср i} = \frac{\sigma_{бр i}}{\sqrt{n}}$  – ошибка среднего значения,

$$\delta_{ско i} = \frac{\sigma_{бр i}}{\sqrt{2n}} \text{ – ошибка СКО.}$$

Значения критериев достоверности сравнивались с критическим значением t-критерия Стьюдента, определенным для доверительной вероятности 0,95 и 99 степеней свободы. В результате значения критерия достоверности среднего  $t_{ср i}$  и критерия достоверности СКО  $t_{ско i}$  для всех выборок диагностических признаков  $Z_i$

оказались больше критического значения t-критерия Стьюдента. Следовательно, с доверительной вероятностью 0,95 истинные значения генеральных СКО совокупностей с нормальным распределением диагностических признаков  $Z_i$  находятся в диапазоне  $\sigma_{бр i} \pm \delta_{ско i}$ , а генеральные средние находятся в диапазоне  $\bar{Z}_i \pm \delta_{ср i}$  [5]. Итого, общая размерность тестовой выборки с рассчитанными диагностическими признаками составляет 2000 векторов  $\vec{Z}^*$  для каждого из 10 дефектов.

С помощью алгоритма диагностирования были классифицированы состояния изделия во всех экспериментах тестовой базы данных и определены вероятности  $P(D_j|\vec{Z}^*)$  соответствующих состояний. Для всех диагнозов  $D_1, \dots, D_{10}$  были рассчитаны средние арифметические вероятности  $P_{ср}(D_j|\vec{Z}^*)$  ряда оценок состояний  $P(D_j|\vec{Z}^*)$ , состоящего из 2000 экспериментов, описывающих дефектное состояния  $S_j$ . Диагнозы алгоритма  $D_1, \dots, D_{10}$  исследуемых дефектных состояний  $S_1, \dots, S_{10}$  в виде осредненных вероятностей  $P_{ср}(D_1|\vec{Z}^*), \dots, P_{ср}(D_{10}|\vec{Z}^*)$ , приведены в таблице 4. Строки таблицы 4 отображают диагнозы алгоритма  $D_1, \dots, D_{10}$  в виде средних вероятностей  $P_{ср}(D_j|\vec{Z}^*)$  для всех экспериментов тестовой выборки, характеризующих одно дефектное состояния  $S_j$ . Диагональ таблицы 4 показывает диагноз алгоритма  $D_j$  для исследуемого состояния  $S_j$ .

Таблица 4

Диагнозы алгоритма диагностирования  $D_j$  для исследуемых дефектных состояний  $S_j$

Дефект \ Диагноз	$D_1$	$D_2$	$D_3$	$D_4$	$D_5$	$D_6$	$D_7$	$D_8$	$D_9$	$D_{10}$
$S_1$	0,906	0,005	0,001	0,010	0,015	0,000	0,019	0,015	0,014	0,013
$S_2$	0,008	0,909	0,027	0,011	0,011	0,001	0,003	0,011	0,009	0,009
$S_3$	0,004	0,020	0,914	0,012	0,012	0,011	0,002	0,012	0,005	0,005
$S_4$	0,000	0,008	0,001	0,930	0,030	0,001	0,000	0,030	0,000	0,000
$S_5$	0,000	0,000	0,000	0,020	0,940	0,000	0,000	0,039	0,000	0,000
$S_6$	0,003	0,002	0,014	0,015	0,015	0,922	0,005	0,015	0,004	0,004
$S_7$	0,006	0,002	0,000	0,015	0,015	0,000	0,943	0,015	0,001	0,001
$S_8$	0,005	0,000	0,000	0,071	0,071	0,000	0,001	0,834	0,009	0,009
$S_9$	0,013	0,004	0,001	0,007	0,011	0,001	0,004	0,011	0,529	0,419
$S_{10}$	0,013	0,004	0,000	0,008	0,012	0,000	0,006	0,012	0,418	0,526

Для оценки качества классификации алгоритмом необходимо выбрать критерий качества. Выбор критерия зависит от целей решаемой задачи. В нашем случае необходимо узнать для каждого класса в отдельности, какая часть данных тестовой выборки корректно классифицирована. Критерием качества, показывающим необходимую пропорцию, является полнота классификации – отношение количества правильных диагнозов к общему количеству определенных диагнозов для каждого класса (27).

$$T_j = \frac{tp_j}{tp_j + fn_j}, \quad (27)$$

где  $T_j$  – полнота классификации для класса  $S_j$ ;

$tp_j$  – количество правильных оценок состояния данных тестовой выборки для класса  $S_j$ ;

$fn_j$  – количество неправильных оценок состояния данных тестовой выборки для класса  $S_j$ ;

При оценке полноты классификации для оцениваемого состояния  $S_j$  выбирается один диагноз  $D_j$  из десяти с максимальной вероятностью  $P(D_j|Z^*)$ . Если данная оценка состояния  $D_j$  совпадает с реально существующим дефектным состоянием  $S_j$ , то такая оценка считается правильной ( $tp_j$ ), если нет – то неправильной ( $fn_j$ ).

Следует отметить, что в данной работе применяется невзвешенный критерий качества, который не зависит от размера выборки для каждого класса. Применение такого критерия является корректным, поскольку количество данных для классификации в тестовой выборке одинаково для каждого класса.

Значения точности классификации алгоритмом диагностирования всех 10 дефектов указаны в таблице 5.

Таблица 5

Значения полноты классификации для диагностируемых дефектов

Обозначение класса дефекта	$S_1$	$S_2$	$S_3$	$S_4$	$S_5$
Полнота классификации $T$ , %	95,5	97	95,5	97,4	97
Обозначение класса дефекта	$S_6$	$S_7$	$S_8$	$S_9$	$S_{10}$
Полнота классификации $T$ , %	97,3	97,7	92	61,3	61,4

Усреднив показания точности для всех дефектов, получим среднюю арифметическую точность диагностирования, равную 89 %.

## Выводы

Исходя из полученных результатов, можно сделать вывод, что алгоритм выполняет основные возложенные на него задачи. В частности, показано, что алгоритм локализует дефекты на одном из основных режимов работы регулятора со средним арифметическим показателем полноты классификации 89 %. Такое значение показателя качества связано со сложностью конструкции регулятора и конструктивно ограниченным количеством измеряемых диагностических параметров. Дальнейшее развитие этого алгоритма связано с увеличением точности классификации, а также увеличения количества диагностируемых дефектов, что, в свою очередь, позволит анализировать техническое состояние регулятора более подробно. Использование в качестве диагностических признаков статических и динамических характеристик конструктивных узлов регулятора в дальнейшем позволит добиться большей точности и глубины диагностирования.

## Литература

1. Биргер, И. А. *Техническая диагностика [Текст] / И. А. Биргер.* - М. : «Машиностроение», 1978. – 240 с.
2. Лобода, И. И. *Повышение надежности авиационных ГТД путем оптимизации системы диагностирования по критериям достоверности [Текст] : дис. ... канд. тех. наук: 05.07.05 / Лобода Игорь Игоревич ; Харьковский авиационный институт – Харьков, 1994. – 267 с.*
3. Оганян, И. В. *Математическая модель топливного насоса-регулятора турбовального двигателя вертолета [Текст] / И. В. Оганян // Авиационно-космическая техника и технология. – 2020. – № 7(167). – С. 105–112. DOI: 10.32620/akt.2020.7.15.*
4. Епифанов, С. В. *Синтез систем управления и диагностирования газотурбинных двигателей [Текст] / С. В. Епифанов, Б. И. Кузнецов, И. Н. Богаенко. – К. : «Техніка», 1998. – 311 с.*
5. *Статистика [Текст] : учеб. для вузов / В. С. Мхитарян [и др.] ; под ред. В. С. Мхитаряна. – М. : «Академия», 2013 – 303 с.*
6. Davies, A. E. *AIDS in engine management programmes [Text] / A. E. Davies // The Aeronautical Journal. – 1978. – vol. 82, Issue № 810. – P. 235-242.*

## References

1. Birger I.A. *Texnicheskaya diagnostika* [Technical diagnostics]. Moscow, «Mashinostroenie» Publ., 1978. 240 p.
2. Loboda, I. I. *Povyshenie nadezhnosti aviacionnyh GTD putem optimizacii sistemy diagnostirovaniya po kriterijam dostovernosti.* Dis. ... kand. teh. Nauk [Improving the reliability of aviation gas turbine

engines by optimizing the diagnostic system based on reliability criteria. Diss. ... cand. tech. sci.] Kharkiv, Kharkiv aviation institute Publ., 1994. 267 p.

3. Ohanian, I. V. *Matematicheskaja model' topivnogo nasosa-reguljatora turboval'nogo dvigatelja vertoletja* [Mathematical model of fuel pump-regulator of helicopter turbo-shaft engine]. *Aviacijno-kosmicna tehnika i tehnologija – Aerospace technic and technology*, 2020, no. 7(167), pp. 105-112. DOI: 10.32620/akt.2020.7.15.

4. Yepifanov, S. V., Kuznetsov, B. I., Bogaenko, I. N., Grabovskij, G. G., Djukov, V. A., Kuz'menko, S.

A., Rjumshin, N. A., Sameckij, A. A. *Sintez sistem upravleniya i diagnostirovaniya gazoturbinnnyx dvigatelej* [Synthesis of control systems and diagnostics of gas turbine engines]. Kyiv, «Tehnika» Publ., 1998. 311 p.

5. Mhitarjan, V. S., Dubrov, T. A., Minashkin, V. G., i dr. *Statistika: ucheb. dlja vuzov* [Statistics: university textbook]. Moscow, «Akademija» Publ., 2013. 303 p.

6. Davies, A. E. AIDS in engine management programmes. *The Aeronautical Journal*, 1978, vol. 82, Iss. 810, pp. 235-242.

Надійшла до редакції 12.07.2021, розглянута на редколегії 16.08.2021

## АЛГОРИТМ КЛАСИФІКАЦІЇ ТЕХНІЧНОГО СТАНУ ПАЛИВНОГО РЕГУЛЯТОРА В ПРОСТОРІ ПАРАМЕТРІВ РОБОЧОГО ПРОЦЕСУ

*I. V. Oghanian, S. V. Yepifanov*

У даній статті вирішується завдання формування алгоритму класифікації технічного стану паливного регулятора турбовального двигуна вертольота в просторі параметрів робочого процесу регулятора і отримання оцінок стану досліджуваного виробу. Розглянуті основні методи класифікації технічного стану, а також обґрунтування вибору методу класифікації стану виробу в просторі вимірюваних параметрів, застосованого для побудови розглянутого в цій статті алгоритму. Визначено критерії наявності несправності в досліджуваному регуляторі і сформовано основні вимоги до алгоритму класифікації. З метою спрощення розв'язуваної задачі було прийнято ряд припущень щодо діагностованих дефектів. У статті описано всі складові алгоритму класифікації. Наведено короткий опис математичної моделі паливного регулятора. Обрано режим роботи регулятора для аналізу і наведено список необхідних для діагностування параметрів стану і список діагностичних параметрів робочого процесу. Описано методику лінеаризації математичної моделі регулятора і методику побудови матриці коефіцієнтів впливу, яка є базовим елементом усього алгоритму. Визначено імовірнісну характеристику достовірності алгоритму класифікації, а також виведено формулу для її розрахунку, що базується на теоремі Байєса. Щоб оцінити якість класифікації алгоритмом діагностування, було сформовано тестову вибірку параметрів робочого процесу. Зазначено методологію побудови тестової вибірки і визначено її розмір. Після отримання алгоритмом класифікації оцінок стану виробу за даними тестової вибірки, розраховано такий критерій якості, як повнота класифікації. В результаті оцінки повноти класифікації сформовано таблицю зі значеннями цього критерію для кожного класу. Повнота класифікації алгоритму в середньому для всіх дефектів склала 89 %. У висновках вказано можливі методи підвищення якості діагностування алгоритмом.

**Ключові слова:** паливний регулятор; діагностика; класифікація; дефект; математична модель; параметри стану; діагностичні ознаки; імовірнісні характеристики достовірності; якість класифікації; повнота класифікації.

## ALGORITHM FOR CLASSIFICATION OF TECHNICAL STATE OF FUEL REGULATOR IN THE SPACE OF OPERATING PROCESS PARAMETERS

*I. Ohanian, S. Yepifanov*

This article solves the problem of constructing an algorithm for classifying the technical state of the fuel regulator of a turboshaft engine of a helicopter in the parameter space of the regulator's working process and obtaining estimates of the state of the investigated product. In the introduction to this work, the main methods of classifying the technical state are considered, and a brief justification for the choice of the method for classifying the state of the product in the space of measured parameters used to construct the algorithm is considered in this article, is given. The criteria for the presence of a malfunction in the investigated controller are determined and the basic requirements for the classification algorithm are formed. To simplify the problem being solved, many assumptions about the diagnosed defects were made. The article provides descriptions of all components of the classification algorithm. A brief description of the mathematical model of the fuel regulator is given. The operating mode of the regulator for analysis is selected, and the list of state parameters required for diagnostics and the list of diagnostic parameters of the working process is given. The technique of linearization of the mathematical model of the controller and the technique of constructing the matrix of influence coefficients, which is the basic element of the entire algorithm, is described. The probabilistic characteristic of the credibility of the classification algorithm is determined, and the

derivation of the formula for its calculation, based on the Bayes theorem, is also given. To assess the quality of the classification by the diagnostic algorithm, a test sample of workflow parameters was formed. The methodology for constructing a test sample is described and its size is determined. After the product condition estimates are obtained according to the test sample data by the classification algorithm, such a quality criterion as the recall is calculated. As a result of assessing the recall, a table was formed with the values of this criterion for each class. The recall of the algorithm on average for all defects was 89 %. The conclusions indicate possible methods for improving the quality of diagnosis by the algorithm.

**Keywords:** fuel regulator; diagnostics; classification; defect; mathematical model; condition parameters; diagnostic signs; probabilistic credibility characteristics; classification quality; recall.

**Оганян Игорь Валериевич** – инженер-конструктор 1 категории, АО «ФЭД»; асп. каф. конструкции и прочности авиационных двигателей и энергетических установок, Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского «Харьковский авиационный институт», Харьков, Украина.

**Епифанов Сергей Валериевич** – д-р техн. наук, проф., зав. каф. конструкции авиационных двигателей, Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского «Харьковский авиационный институт», Харьков, Украина.

**Ihor Ohanian** – first category design engineer, JSC FED; PhD student of the Department of Design and Strength of Aircraft Engines and Power Plants, National Aerospace University “Kharkiv Aviation Institute”, Kharkiv, Ukraine,  
e-mail: oganyan93@gmail.com, ORCID: 0000-0003-1197-0160.

**Sergiy Yepifanov** – Doct. of Sc., Engineering, Professor, Head of Aircraft Engine Design department, National Aerospace University “Kharkiv Aviation Institute”, Kharkiv, Ukraine,  
e-mail: s.yepifanov@khai.edu, ORCID: 0000-0003-0533-9524, SCOPUS Author ID: 6506749318.