

УДК 621.452:681.5

doi: 10.32620/aktt.2025.2.01

І. В. ОГАНЯН<sup>1,2</sup>, С. В. ЄПФАНОВ<sup>2</sup><sup>1</sup> АТ «ФЕД», Харків, Україна<sup>2</sup> Національний аерокосмічний університет ім. М. Є. Жуковського «Харківський авіаційний інститут», Харків, Україна

## ПЕРЕВІРКА МЕТОДУ КЛАСИФІКАЦІЇ ТЕХНІЧНОГО СТАНУ ПАЛИВНОГО РЕГУЛЯТОРА ТУРБОВАЛЬНОГО ДВИГУНА В ПРОСТОРІ ПАРАМЕТРІВ РОБОЧОГО ПРОЦЕСУ В УМОВАХ ЗАВОДСЬКИХ ВИПРОБУВАНЬ

У статті представлено результати перевірки методу класифікації технічного стану паливного регулятора турбовального двигуна вертольота в просторі параметрів робочого процесу в умовах реальних заводських випробувань. Застосований метод діагностування базується на математичній моделі паливного регулятора, що враховує вплив відхилення конструктивних параметрів на діагностичні ознаки. У цій роботі для кожної перевірки визначено діагностовані конструктивні параметри та відкинуті ті конструктивні параметри, які мають великий коефіцієнт кореляції відносно впливу на діагностичні ознаки. Обґрунтовано необхідність ідентифікації математичної моделі регулятора для застосування методу класифікації технічного стану. Описано метод однофакторної ідентифікації математичної моделі паливного регулятора по показанням тиску робочої рідини перед еквівалентним спротивом першого контуру форсунок. Процедура класифікації технічного стану реалізовано в два етапи: визначення умовних ймовірностей відношення поточного стану регулятора  $S$ , до одного з модельованих дефектів за теоремою Байєса та встановлення діагнозу за максимальним значенням ймовірності. Дослідження проведено на експериментально-виробничій базі підприємства АТ «ФЕД» на семи гідромеханічних паливних регуляторах. Під час випробувань за контрольованими параметрами визначено основні несправності, а також виконано класифікацію станів регуляторів за допомогою запропонованого методу. Проаналізовано ефективність методу за кількісними показниками якості класифікації: загальна точність становила від 90,48% до 100%, а мікро-усереднена точність – від 66,67% до 100%, залежно від перевірки. Установлено, що запропонований метод демонструє високу ефективність на більшості режимів роботи двигуна, однак його точність залежить від ступеня кореляції конструктивних параметрів, що діагностуються, та точності ідентифікації математичної моделі. Запропоновано шляхи подальшого вдосконалення методу шляхом використання експертних систем і розробки ефективних алгоритмів ідентифікації. Метод може бути рекомендований для інтеграції у виробничі технології ремонту за технічним станом з метою підвищення точності діагностування та оптимізації ремонтних робіт.

**Ключові слова:** авіаційний двигун; паливний регулятор; технічний стан; діагностування; локалізація несправності; дефект; експеримент; якість класифікації; загальна точність класифікації, мікро-усереднена точність класифікації.

### Вступ

До паливних систем авіаційної техніки висуваються суворі вимоги щодо забезпечення їх надійної роботи. Відмова такого агрегату паливної системи вертольота, як паливний регулятор турбовального двигуна, може призвести до значних ускладнень польоту та аварійних ситуацій. Для підтримки працездатності агрегатів паливної системи протягом усього міжремонтного ресурсу та терміну служби з визначеним рівнем надійності необхідно своєчасно виконувати ремонтні роботи. Найефективнішим видом ремонту з технологічної та економічної точок зору є ремонт за технічним станом, який потребує розроблення діагностичних

методів для оцінювання реального технічного стану паливних регуляторів. На підприємстві АТ «ФЕД» було розроблено технологію ремонту за технічним станом гідромеханічного паливного регулятора. Відповідно до цієї технології паливний регулятор, що надійшов до ремонту, повинен пройти через наступні стадії технологічного процесу: вхідний контроль параметрів, локалізація несправностей, дефектація та сам ремонт виробу, з подальшим складанням і регулюванням. Ключовою частиною технології ремонту за технічним станом є процес виявлення несправностей та їх локалізація з метою подальшого усунення під час ремонту. Для реалізації технології локалізації несправностей авторами цієї статті розроблений метод параметричного



діагностування паливного регулятора в просторі параметрів робочого процесу на базі математичної моделі, описаний в роботах [1, 2]. Ефективність цього методу була попередньо проаналізована на тестовій вибірці з штучно-модельованими даними для різних дефектних станів. Середня арифметична точність діагностування для розглянутих дефектів становила 79,3% [2], що є достатньо хорошим показником для подальшого впровадження методу діагностування у виробництво. Перед впровадженням у виробництво ефективність методу діагностування необхідно підтвердити в умовах заводських випробувань. Тому дані про параметри робочого процесу паливних регуляторів, що пройшли етап вхідного контролю параметрів згідно технологічного процесу ремонту за технічним станом, було використано для оцінки ефективності локалізації несправності розробленим методом діагностування. За кількісну метрику ефективності було обрано показники якості класифікації несправних станів.

## 1. Постановка задачі

Можна визначити наступні основні цілі перевірки методу класифікації технічного стану паливного регулятора в умовах заводських випробувань:

- підтвердити ефективність методу в умовах реального виробництва;

- визначити найбільш інформативні діагностичні ознаки та мінімальний набір конструктивних параметрів, що дозволяють точно класифікувати стан агрегатів;

- оцінити можливості застосування розробленого методу й окреслити його обмеження.

Для реалізації поставлених цілей були вирішені наступні задачі:

- Підготовка до діагностування: визначення складу перевірок, а також складу конструктивних параметрів, що діагностуються;

- Проведення експерименту: визначення несправностей альтернативними (не залежними від досліджуваного) методами, збір діагностичних даних – вимірюваних параметрів робочого процесу  $Y$ ;

- Діагностування: обробка діагностичних даних за допомогою розробленого методу класифікації технічного стану. В результаті діагностування визначені значення ймовірностей відношення поточного стану регулятора  $S$  до кожного з дефектів (станів)  $S_1, S_2, \dots, S_q$  по інформації, що міститься у векторі вимірюваних параметрів робочого процесу  $Y$ ;

- Аналіз ефективності застосування методу класифікації технічного стану паливного регулятора

в просторі параметрів робочого процесу. Ефективність діагностування була визначена за показниками якості класифікації дефектів.

## 2. Опис експерименту

Експериментальне дослідження проведено на базі підприємства АТ «ФЕД» у межах технологічного процесу ремонту за технічним станом паливних регуляторів турбовальних двигунів. Процедура включала етапи вхідного контролю параметрів, локалізації несправностей, дефектації, ремонту та регулювання агрегатів.

Для оцінки запропонованого методу класифікації було використано результати саме етапу вхідного контролю параметрів. Відібрано сім агрегатів, для яких було виявлено несправності при різних перевірках:

*Перевірка 1.* Перевірка першої точки земної характеристики автомата прискорення (АП), перевірка перепаду тиску на дозуючій голці (ДГ) АП  $\Delta p_{АП}$ .

*Перевірка 2.* Перевірка другої точки земної характеристики АП.

*Перевірка 3.* Перевірка налаштування регулятора обертів турбокомпресора (РО ТК) на режимі обмеження максимальної частоти обертання турбокомпресора  $n_{ТК}$ .

*Перевірка 4.* Перевірка налаштування регулятора частоти обертання вільної турбіни (РО ВТ).

При першій перевірці контрольований параметр – це перепад тиску палива на ДГ АП, який розраховується як різниця між тиском палива за ДГ АП  $p_{АП}$  і тиском палива за основною дозуючою голкою  $p_{ДГ}$  [1], а також витрата палива  $G_p$  при цьому перепаді тиску. При інших перевірках контрольований параметр –  $G_p$ . Необхідні значення та допустимі діапазони контрольованих параметрів для зазначених перевірок наведено в таблиці 1.

Перевірки, зазначені в табл. 1, розміщені в порядку, в якому проводилися під час експерименту. Вони впорядковані таким чином, що дефекти, виявлені при кожній подальшій перевірці, не впливають на дефекти, виявлені на попередніх перевірках. Цей порядок дозволяє підвищити інформативність отриманих даних [3, 4] і таким чином зменшити кількість можливих причин виникнення несправностей.

Підтвердження результатів класифікації дефектів методом діагностування було організовано в наступний спосіб. При кожній перевірці вимірювався контрольований параметр. У разі виявлення його невідповідності вимогам технічних умов агрегат регулювали відповідно до технологіч-

Таблиця 1  
Значення контрольованих параметрів  
при виконаних перевірках

Перевірка	Вимога
Перевірка першої точки земної характеристики АП; перевірка перепаду тиску на ДГ АП $\Delta p_{АП}$	$G_{п}=180\pm 10$ кг/год, $\Delta p_{АП}=7,5\pm 0,5$ кгс/см <sup>2</sup>
Перевірка другої точки земної характеристики АП	$G_{п}=454\pm 22$ кг/год
Перевірка налаштування регулятора РО ТК на режимі обмеження максимальної частоти обертання $n_{ТК}$	$G_{п}=480\pm 8$ кг/год
Перевірка налаштування регулятора РО ВТ	$G_{п}=330\pm 5$ кг/год

ного процесу з метою усунення невідповідності. Якщо відрегулювати агрегат не вдалося, цей дефект фіксувався в протоколі випробувань і після завершення всіх перевірок агрегат надходив на дефектацію. На етапі дефектації агрегат розбирався, і для всіх деталей і вузлів, що працюють на режимах з виявленими несправностями, перевірялася відповідність розмірів деталей вимогам конструкторської документації. Таким чином, результат класифікації дефектів методом діагностування порівнювався з результатом повторного регулювання агрегату або з результатами обмірів деталей та вузлів на етапі дефектації.

Вхідний контроль параметрів досліджуваного агрегату проводився на тому самому гідравлічному стенді (рис. 1), на якому проводиться регулювання та пред'явлення агрегатів даного типу.

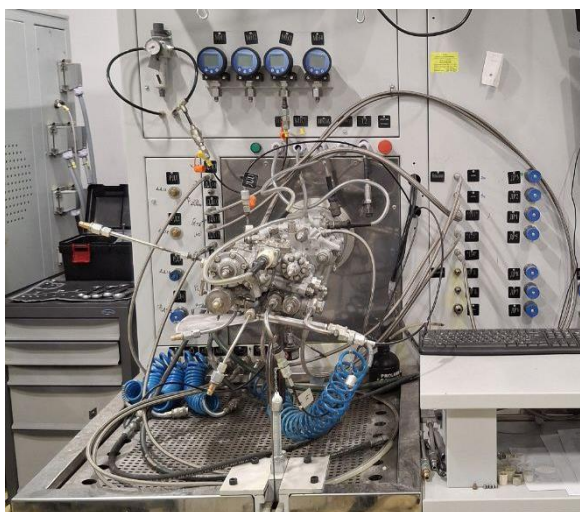


Рис. 1. Стенд для випробувань паливного регулятора

При цьому під час перевірок осцилографувалися всі параметри робочого процесу, зазначені в табл. 2. Основна частина цих параметрів є діагностичними ознаками методу діагностування (крім  $p_{\text{повітря}}$ ). При проведенні перевірок використовувалися засоби вимірювальної техніки з метрологічними та технічними характеристиками, зазначеними в табл. 2. Час осцилографування на режимі становить мінімум 10 с. Частота осцилографування – 20 Гц.

Таблиця 2  
Параметри робочого процесу досліджуваного агрегату, що осцилографувалися

Позначення	Опис місця вимірювання тиску	Засоби вимірювальної техніки
$p_{\text{повітря}}$	Тиск повітря, підведеного до АП	ДТ18 – АП
$G_{п}$	Витрата палива на виході з паливного регулятора	Вимірник витрати ВВ Kracht VC 1 K 2 F 3 R 2 S від 0,4 до 80 л/хв
$P_{1к}$	Тиск палива перед 1 контуром форсунок	Датчик тиску ДТЗ ADZ Nagano 0...100 кгс/см <sup>2</sup>
$P_{2к}$	Тиск палива перед 2 контуром форсунок	Те ж
$P_{Н}$	Тиск палива за насосом НР-3	Те ж
$P_{ОДГ}$	Тиск палива за основною дозуючою голкою	Те ж
$P_{АП}$	Тиск палива за дозуючою голкою АП	Те ж
$P_{Ю}$	Тиск у порожнині «Ю»	Те ж
$P_{КМТ\ ТК}$	Тиск палива за клапаном мінімального тиску турбокомпресора (КМТ ТК)	Те ж
$P_{СП}$	Тиск палива за синхронізатором потужності (СП)	Те ж
$P_{дфкл}$	Тиск палива в порожнині дифклапана блоку клапанів (БК)	Те ж
$P_{птк}$	Тиск палива, пропорційний $n_{ТК}^2$	Те ж
$P_{зливу}$	Тиск зливу	Те ж
$P_{екв}$	Тиск перед еквівалентом спротиву камери згоряння	Те ж
$P_{КПТ}$	Тиск за клапаном постійного тиску (КПТ)	Те ж

### 3. Метод класифікації технічного стану паливного регулятора турбовального двигуна в просторі параметрів робочого процесу

Метод діагностування, що розглядається в цій роботі, відноситься до методів класифікації стану в просторі вимірюваних параметрів [5, 6] та детально описаний у роботі авторів [2]. Він полягає в класифікації несправного стану виробу за вимірними діагностичними параметрами з множини можливих несправних станів. Несправні стани моделюються шляхом розрахунку параметрів робочого процесу за допомогою математичної моделі регулятора з відхиленням певних конструктивних параметрів для імітації відповідних дефектів. Кількість дефектів, доступних для діагностування, обмежена глибиною моделювання, кількістю та складом вимірюваних діагностичних параметрів робочого процесу.

У цій роботі динаміка розвитку несправностей не розглядається. Розглядається задача оцінювання стану об'єкта за результатами вимірювання параметрів робочого процесу в заданий момент часу або протягом періоду часу, за який стан об'єкта та параметри робочого процесу змінюються незначно. Діагностування здійснюється для множини несправних станів паливного регулятора, укладених між несправним та працездатним станами. З метою спрощення задачі було прийнято низку припущень. Кожен із класифікованих дефектів пов'язаний із відхиленням одного конструктивного параметра, а відхилення параметрів робочого процесу, що характеризують цей дефект, незмінні в часі. Таке припущення незначно впливає на практичну значущість методу, що розглядається, оскільки кількість вимог технічної документації до робочого процесу на стаціонарних режимах роботи набагато більше від кількості вимог щодо динамічних режимів роботи. Також з метою спрощення прийнято, що події, які призводять до дефектів, є незалежними.

Основою запропонованого методу є математична модель регулятора, яка була лінеаризована для зручності діагностування [2] і представлена у вигляді матриці коефіцієнтів впливу (МКВ), що показує залежність вимірюваних параметрів робочого процесу (тиску, витрати палива) від конструктивних параметрів паливного регулятора (прохідні перерізи дроселів, жорсткість пружин, попередня затяжка пружин регулятора, тощо). Лінійна математична модель паливного регулятора описується формулою

$$Z_i = H_{ij} \cdot \delta\theta_j, \quad (1)$$

де  $Z_i$  – компонент вектора істинних діагностичних ознак;

$\delta\theta_j$  – відносне відхилення конструктивного параметра від вихідного значення  $\theta_{0j}$ ;

$H_{ij}$  – елемент матриці коефіцієнтів впливу.

Процедура класифікації стану регулятора включає два основних етапи. На першому етапі здійснюється розрахунок умовних імовірностей  $P(D_j|\bar{Z}^*)$  наявності конкретних дефектів  $D_j$  при вимірюванні вектору діагностичних ознак  $\bar{Z}^*$  із використанням теореми Байєса:

$$P(D_j|\bar{Z}^*) = \frac{P(\bar{Z}^*|S_j) \cdot P(S_j)}{\sum_{j=1}^q P(\bar{Z}^*|S_j) \cdot P(S_j)}, \quad (2)$$

де  $P(S_j)$  – апіорна ймовірність виникнення дефекту  $S_j$ ;

$q$  – кількість діагностованих дефектів; у разі, якщо дефекти рівноймовірні,

$$P(S_j) = \frac{1}{q}; \quad (3)$$

$P(\bar{Z}^*|S_j)$  – апостеріорна ймовірність вимірювання вектора ознак  $\bar{Z}^*$  за наявності дефекту  $S_j$ .

На другому етапі за максимальним значенням отриманих умовних ймовірностей  $P(D_j|\bar{Z}^*)$  визначається найбільш імовірний клас дефекту.

Для реалізації першого етапу розробленого методу діагностування для кожного діагностованого виробу та кожної перевірки, для яких були визначені несправності, виконані математичні перетворення, викладені в роботі [2]. Схема для розрахунку умовної ймовірності спостереження дефекту наведена на рис. 2.

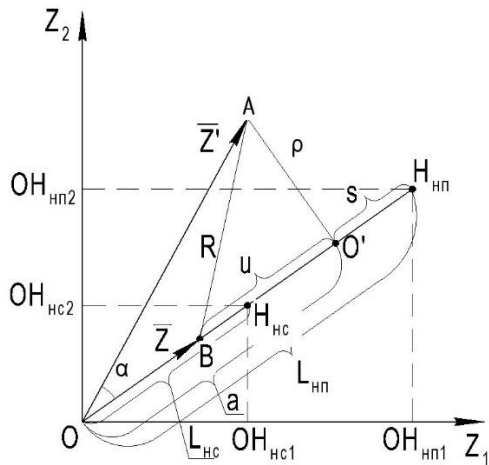


Рис. 2. Схема до розрахунку умовної ймовірності спостереження дефекту

Виходячи з того, що метод діагностування оперує відносними відхиленнями параметрів робочого процесу, всі виміряні параметри робочого процесу були переведені в безрозмірну форму відносних відхилень  $\delta Y$ :

$$\delta Y = \frac{Y - Y_0}{Y_0}, \quad (4)$$

де  $Y$  – вектор значень виміряних параметрів робочого процесу.

Відповідно до умовних позначень, введених у попередній роботі [2], позначимо вектор відносних відхилень вимірювань як  $\bar{Z}^*$ .

Значення вектора відносних відхилень дійсних параметрів робочого процесу  $\bar{Z}$  та вектора відносних відхилень вимірювань  $\bar{Z}^*$  необхідно нормалізувати, розділивши кожне відносне відхилення параметра робочого процесу на відповідне безрозмірне середньоквадратичне відхилення  $\sigma_{br i}$ :

$$Z_i = \frac{\delta Y_i}{\sigma_{br i}}; \quad (5)$$

$$\sigma_{br i} = \frac{\sigma_i}{Y_{0i}}, \quad (6)$$

де  $\sigma_i$  – значення середньоквадратичних відхилень, взяті з технічної документації на вимірювальні пристрої [2].

Для кожної перевірки було розраховано матрицю коефіцієнтів впливу. Для прикладу в табл. 3 наведена МКВ для перевірки 1.

Для спрощення завдання та попередньої оцінки якості методу діагностування, МКВ була розрахована при відхиленнях конструктивних параметрів у додатний бік на 5%.

Далі за допомогою лінійної ММ (формули (7), (8)) було визначено вектори відхилень діагностичних ознак, які відповідають несправному та непрацездатному станам при конкретній перевірці:

$$OH_{nc i} = H_{ij} \cdot X_{nc j}; \quad (7)$$

$$OH_{np i} = H_{ij} \cdot X_{np j}, \quad (8)$$

де  $X_{nc j}$  – відхилення  $j$ -го конструктивного параметра, яке приводить об'єкт у несправний стан;

$X_{np j}$  – відхилення  $j$ -го конструктивного параметра, яке приводить об'єкт у непрацездатний стан.

Значення кожного з відхилень конструктивних параметрів  $X_{nc j}$ , що діагностуються, підбиралися до моменту досягнення значенням контрольованого параметра робочого процесу граничної межі допуску, вказаного в технічній документації.

Таблиця 3

МКВ для перевірки 1

Параметр	Smem0	Дросель Д	к <sub>дфклн</sub>	Проливка кл. ВТ	Продук. насоса	відкриття зол. п <sub>тк1</sub>	14 гвинт
G <sub>п</sub>	2,388381	-0,95437	0,113579	-0,00453	-0,00012	0,425753	0,301967
P <sub>1к</sub>	0,694873	-0,36756	0,031832	-0,00076	-0,00024	0,119594	0,084969
P <sub>2к</sub>	11,50914	-3,65648	0,480829	-0,0194	-0,00068	1,83465	1,29245
P <sub>АП</sub>	0,602614	-0,3191	0,027698	-0,00049	-0,00019	0,103815	0,073685
P <sub>ОДГ</sub>	1,358532	-0,58121	0,061724	-0,00176	-7,36E-05	0,232056	0,061199
P <sub>Н</sub>	1,273371	-0,54487	0,057502	-0,00211	0,002132	0,217228	0,057086
P <sub>дфкл</sub>	0,00961	-0,00691	0,226209	-0,00958	0,00212	0,858835	-0,00092
P <sub>п<sub>тк</sub></sub>	0,016462	-0,00981	-0,00043	-0,00183	0,001337	1,068246	-0,00055
P <sub>Ю</sub>	1,405344	-0,6007	0,063893	-0,00147	6,50E-05	0,24077	0,06417
P <sub>КМТ ТК</sub>	1,371144	-0,58721	0,061971	-0,07018	-0,00035	0,233966	0,061906
P <sub>СП</sub>	1,371757	-0,58627	0,062413	-0,07799	-2,42E-05	0,234683	0,062071
P <sub>КПТ</sub>	0,019159	-0,00946	0,000714	-0,00031	0,000634	-0,00816	0,000817

Значення кожного з відхилень конструктивних параметрів  $X_{\text{нп } j}$ , що діагностуються, підбиралися за умови досягнення значення відхилення контрольованого параметра робочого процесу  $OH_{\text{нп}}$  0,4 (40 %).

Після цього було визначено норми векторів  $OH_{\text{нс}}$  та  $OH_{\text{нп}}$ :

$$L_{\text{нс}} = \sqrt{OH_{\text{нс1}}^2 + OH_{\text{нс2}}^2 + \dots + OH_{\text{нсi}}^2}; \quad (9)$$

$$L_{\text{нп}} = \sqrt{OH_{\text{нп1}}^2 + OH_{\text{нп2}}^2 + \dots + OH_{\text{нпi}}^2}. \quad (10)$$

Було також визначено косинусну відстань між вектором відхилень дійсних значень параметрів робочого процесу  $\bar{Z}$  та вектором відхилень діагностичних ознак досліджуваного агрегату  $\bar{Z}^*$ :

$$\cos(\alpha) = \frac{\bar{Z}^* \cdot \bar{Z}}{\|\bar{Z}^*\| \cdot \|\bar{Z}\|}. \quad (11)$$

За значеннями косинусної відстані між вектором відхилень дійсних значень параметрів робочого процесу та вектором відхилень діагностичних ознак, а також нормами векторів  $L_{\text{нс}}$ ,  $L_{\text{нп}}$ , була визначена функція ймовірності  $P(\bar{Z}^* | S_j)$  вимірювання вектора діагностичних ознак  $\bar{Z}^*$  за наявності дефекту  $S_j$  та розраховані межі її інтегрування:

$$P(\bar{Z}^* | S_j) = \frac{e^{-\rho^2/2}}{L_{\text{нп}} - L_{\text{нс}}} \int_{-|a_j|}^{|L_{\text{нп}} j - a_j|} \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-u^2/2} du, \quad (12)$$

де значення множників  $\alpha$  і  $\rho$  для кожного  $j$ -го дефекту вираховувалося за формулами

$$a = \|\bar{Z}^*\| \cos(\alpha); \quad (13)$$

$$\rho = \|\bar{Z}^*\| \sin(\alpha). \quad (14)$$

Ця функція була проінтегрована в зазначених межах, після чого були отримані значення умовної

ймовірності  $P(\bar{Z}^* | S_j)$ . Підстановка співвідношень для ймовірностей  $P(S_j)$  (3) і  $P(\bar{Z}^* | S_j)$  (14) у вираз (2) дозволила отримати значення умовної ймовірності  $P(D_j | \bar{Z}^*)$  наявності дефекту  $D_j$ , що відноситься до класу  $S_j$ , при вимірюванні вектора діагностичних ознак  $\bar{Z}^*$ .

#### 4. Визначення переліку конструктивних параметрів паливного регулятора, що діагностуються, для кожної перевірки

Перед тим, як приступити до локалізації несправностей за допомогою методу діагностування для кожної перевірки з табл. 1, необхідно визначити перелік конструктивних параметрів паливного регулятора, що діагностуються, відхилення від норми яких може вплинути на зміни контрольованого параметра робочого процесу. З цією метою за допомогою математичної моделі паливного регулятора для кожної перевірки було визначено наявність впливу зміни конструктивного параметра на контрольовані параметри робочого процесу. З метою виключення конструктивних параметрів, що значно корелюють між собою за ступенем впливу на діагностичні ознаки, було розраховано кореляційну матрицю  $R_{ij}$  для кожної перевірки [7]:

$$R_{ij} = \frac{\sum_{i=1}^n (H_{ij} - \bar{H}_j)(H_{ik} - \bar{H}_k)}{\sigma_i \cdot \sigma_j}, \quad (15)$$

де  $H_{ij}$  і  $H_{ik}$  – елементи матриці коефіцієнтів впливу  $N$  конструктивних параметрів на діагностичні ознаки;

$n$  – кількість діагностичних ознак;

$\bar{H}_j$  і  $\bar{H}_k$  – середні значення стовпців  $j$  і  $k$ ;

$\sigma_i$  і  $\sigma_j$  – стандартні відхилення стовпців  $i$  та  $j$

вихідної матриці  $N$ .

За результатами аналізу кореляційних матриць були відкинуті пари параметрів, що діагностуються, які мають коефіцієнт кореляції більше 0,99. Відкинувши зазначені конструктивні параметри, для кожної перевірки було сформовано перелік конструктивних параметрів, що діагностуються, представлений у табл. 4.

Таблиця 4

Перелік параметрів, що діагностуються в різних перевірках

Перевірка 1	$S_{\text{мем0}}$ , Дросель Д, $k_{\text{дфкл}}$ , Пролівка кл. ВТ, Продук. Насоса, відкриття зол. $n_{\text{ТК1}}$ , 14 гвинт
Перевірка 2	$S_{\text{мем0}}$ , Дросель Д, $k_{\text{дфкл}}$ , Пролівка кл. ВТ, Продук. Насоса, відкриття зол. $n_{\text{ТК1}}$ , 14 гвинт
Перевірка 3	732 жиклер, Продук. Насоса, Коef. С тах. ТК, $k_{164}$ пружина ТК, Діам кл ТК
Перевірка 4	732 жиклер, Дросель СП, $k_{\text{одг}}$ , Коef. С тах. ВТ

У табл. 4 використано такі позначення:

$S_{\text{мем0}}$  – ефективна площа мембрани нульового перепаду АП;

$k_{\text{дфкл}}$  – жорсткість пружини диференційного клапану АП;

Пролівка кл. ВТ – пролівка клапана регулятора частоти обертання вільної турбіни;

Продук. насоса – продуктивність насоса паливного регулятора;

відкриття зол.  $n_{\text{ТК1}}$  – відкриття золотника, пропорційне квадрату обертів частоти обертання привода турбокомпресора;

14 гвинт – гвинт регулювання витрати палива при перевірках 1, 2 (робота АП);

732 жиклер – жиклер, через який дозується робоча рідина, яка надходить до регуляторів РО ТК та РО ВТ;

Коef. Стах.ТК – коефіцієнт зусилля від таходатчика, пропорційний квадрату частоти обертання привода турбокомпресора;

$k_{164}$  пружина ТК – жорсткість пружини регулювання регулятора частоти обертання турбокомпресора;

Діам. кл. ТК – діаметр клапана регулятора частоти обертання турбокомпресора;

Дросель СП – поперечний переріз клапана синхронізатора потужності;

$k_{\text{одг}}$  – жорсткість пружини сервопоршня керування основної дозуючої голки;

Коef. С тах. ВТ – коефіцієнт зусилля від таходатчика, пропорційний квадрату частоти обертання привода вільної турбіни.

## 5. Ідентифікація ММ агрегату

Діагностування гідроагрегатів у просторі вимірюваних параметрів робочого процесу з використанням еталонних діагностичних моделей тягне за собою необхідність ідентифікації та уточнення цих моделей з використанням реальних експериментальних даних [8, 9]. Необхідність ідентифікації діагностичної ММ визначається кількома причинами.

Еталонні моделі з відомими дефектами служать основою для оцінювання технічного стану досліджуваного виробу, однак можуть неточно відображати конкретний гідравлічний агрегат, що характеризується набором певних діагностичних ознак. Кожна гідравлічна система має унікальні характеристики, зумовлені наявністю відхилень

параметрів деталей та складальних одиниць, а також різними умовами експлуатації. Реальні експериментальні дані конкретного виробу дозволяють уточнити еталонну модель, наблизивши її характеристики до характеристик досліджуваного агрегату.

Гідравлічні агрегати можуть випробовуватися на різних випробувальних стендах, кожен з яких має власний гідравлічний опір, що значно впливає на роботу агрегату й може спричинити зміну контрольованих параметрів робочого процесу. Реальні дані допомагають скоригувати модель з урахуванням цих обставин.

Гідравлічний опір випробувального стенда, на якому проводився даний експеримент, складається з еквівалентних опорів першого та другого контурів форсунок, а також опору камери згоряння. Гідравлічний опір зазначених елементів визначається характеристиками дроселів, еквівалентних каналам течії робочої рідини. У математичній моделі агрегата ці дроселі характеризуються площами прохідних перерізів  $F_{1к}$ ,  $F_{2к}$ ,  $F_{\text{екв}}$ . Зміна опору цих елементів веде до зміни тиску робочої рідини в усіх точках вимірювання, а також спричиняє зміну контрольованого параметра (витрати палива). Подібним чином впливає на роботу агрегату налаштування відкриття підпірно-запірного клапана другого контуру форсунок. Налаштування цього клапана має дуже широкий допуск щодо тиску відкриття та початкової витрати робочої рідини при відкритті клапана. Зміна налаштувань підпірно-запірного клапана другого контуру форсунок у межах зазначеного допуску, так саме як зміна опору стенду, призводить до значної зміни тиску палива в точках вимірювання та зміни контрольованої витрати палива на режимах роботи регуляторів РО ТК, РО ВТ. У математичній моделі налаштування відкриття клапана задане значенням жорсткості пружини  $k_{\text{рк}}$  та її зтяжки  $x_{\text{рк}}$ . Тому для ідентифікації ММ були підібрані значення параметрів  $F_{1к}$ ,  $F_{2к}$ ,  $F_{\text{екв}}$ ,  $k_{\text{рк}}$ ,  $x_{\text{рк}}$  таким чином, щоб розрахункове значення тиску в точці вимірювання  $p_{1к}$  збігалося з реальними експериментальними даними. У результаті підбору абсолютна похибка між розрахунковими значеннями тиску робочої рідини  $p_{1к}$  та експериментальними значеннями не перевищувала 1,5 кгс/см<sup>2</sup>.

## 6. Аналіз результатів експериментальної перевірки методу класифікації технічного стану паливного регулятора турбовального двигуна в просторі параметрів робочого процесу

У процесі вхідного контролю параметрів було перевірено 7 паливних регуляторів. Для кожного з агрегатів було виявлено низку невідповідностей вимогам технічних умов при різних перевірках. У табл. 5 для кожного досліджуваного агрегата надано в безрозмірному вираженні значення

відхилень контрольованого параметра (витрати палива) для кожної перевірки, на якій було виявлено несправність.

Для всіх агрегатів, у яких була виявлена несправність при визначеній перевірці, була виконана локалізація несправності за допомогою розробленого методу діагностування. У табл. 6–9 наведено значення умовної ймовірності  $P(D_j | Z^*)$  наявності дефекту  $D_j$ , що відноситься до класу  $S_j$ , який пов'язаний зі зміною певного конструктивного параметра, для кожної перевірки відповідно.

Таблиця 5

Значення відхилень контрольованої витрати палива для кожного досліджуваного агрегату

№ агрегату	Перевірка 1	Перевірка 2	Перевірка 3	Перевірка 4
652	-0,08096	-0,05806	0,07533	-0,14102
712	-0,05012	-0,06425	0,163871	-0,23646
125	-	-	0,15612	-0,49463
608	-0,1058	-0,14972	-	-0,24383
246	-	-	-	-0,07391
1044	-	-	-0,46041	0,359398
7044	-	-	-0,61575	0,333909

Таблиця 6

Значення умовної ймовірності спостереження дефекту  $D_j$  класу  $S_j$  для перевірки 1

№	$S_{mem0}$	Дросель Д	$k_{дфкл}$	Проливка кл. ВТ	Продук. насоса	відкриття зол. птк1	14 гвинт
652	1,05E-09	0,9999999	1,28E-20	5,14E-105	0	1,38E-26	0
712	5,59E-05	1,00E+00	4,51E-26	3,07E-63	0,00E+00	2,89E-43	0
608	6,00E-12	4,18E-11	5,42E-09	6,95E-09	6,73E-141	1	4,10E-93

Таблиця 7

Значення умовної ймовірності спостереження дефекту  $D_j$  класу  $S_j$  для перевірки 2

№	$S_{mem0}$	Дросель Д	$k_{дфкл}$	Проливка кл. ВТ	Продук. насоса	відкриття зол. птк1	14 гвинт
652	0	0	0	0	0	0	1
712	0	0	0	0	0	0	1
608	0	0	0	0	0	0	1

Таблиця 8

Значення умовної ймовірності спостереження дефекту  $D_j$ , що відноситься до класу  $S_j$ , для перевірки 3

№	732 жиклер	Продук. насоса	Коеф. С тах. тк	$k_{164}$ пружина ТК	Діам. кл. ТК
652	1,25E-16	0	0	1	0
712	0	0	1	0	0
125	2,37E-10	0	1	2,80E-15	3,30E-08
1044	0	0	1	0	0
7044	0	0	1	0	0



Таблиця 9

Значення умовної ймовірності спостереження дефекту  $D_j$ , що відноситься до класу  $S_j$  для перевірки 4

№	732 жиклер	Дросель СП	кодг	Коеф. С тах. ВТ
652	0	0	7,19E-05	0,999928
712	0	0	0	1
125	0,092799	9,12E-06	0	0,907192
608	0	0	0	1
246	0,023568	0,0095	0,039446	0,927486
1044	0	0	0	1
7044	0,846648	0,153352	0	0

Для отримання вхідних даних для розрахунку показників точності класифікації, було визначено матриці помилок класифікації для кожної перевірки, наведені в таблицях 10–13.

Таблиця 10

Матриця помилок класифікації для перевірки 1

	TP	TN	FP	FN
Клас 1	0	3	0	0
Клас 2	2	0	0	1
Клас 3	0	3	0	0
Клас 4	0	3	0	0
Клас 5	0	3	0	0
Клас 6	0	2	1	0
Клас 7	0	3	0	0

Таблиця 11

Матриця помилок класифікації для перевірки 2

	TP	TN	FP	FN
Клас 1	0	3	0	0
Клас 2	0	3	0	0
Клас 3	0	3	0	0
Клас 4	0	3	0	0
Клас 5	0	3	0	0
Клас 6	0	3	0	0
Клас 7	3	0	0	0

Таблиця 12

Матриця помилок класифікації для перевірки 3

	TP	TN	FP	FN
Клас 1	0	5	0	0
Клас 2	0	5	0	0
Клас 3	4	0	0	1
Клас 4	0	4	1	0
Клас 5	0	5	0	0

Таблиця 13

Матриця помилок класифікації для перевірки 4

	TP	TN	FP	FN
Клас 1	0	6	1	0
Клас 2	0	7	0	0
Клас 3	0	7	0	0
Клас 4	6	0	0	1

Позначення TP «True Positive», TN «True Negative» – це вірні передбачення алгоритму класифікації про спостереження певного класу (True Positive), або не спостереженні даного класу (True Negative);

FP «False Positive», FN «False Negative» – невірні передбачення алгоритму класифікації про спостереження певного класу (False Positive), чи не спостереженні даного класу (False Negative).

Для об'єктивної оцінки якості класифікації було отримано кількісні показники. У цій роботі було використано такі показники, як загальна точність та мікро-усереднена точність.

Загальна точність (Overall Accuracy) вимірює частку правильно класифікованих випадків від загальної кількості всіх випадків:

$$\text{Accuracy} = \frac{\text{Усього правильних класифікацій (TP+TN)}}{\text{Загальна кількість випадків}} \quad (16)$$

Мікро-усереднена точність (Micro-averaged Precision) – це метрика для оцінки якості класифікації, яка визначається шляхом агрегування істинно позитивних та хибно-позитивних результатів за всіма класами та визначення точності на основі цих агрегованих даних за формулою [10, 11]

$$\text{Micro Precision} = \frac{\text{Загальна кількість TP}}{\text{Загальна кількість TP + Загальна кількість FP}} \quad (17)$$

Ця метрика особливо корисна у випадках з незбалансованими наборами даних, оскільки вона враховує внесок кожного класу в загальну кількість істинно позитивних і хибно-позитивних результатів, забезпечуючи точніше уявлення загальної ефективності класифікатора:

На основі інформації матриць помилок (табл. 10–13), використовуючи формули (16), (17), для всіх перевірок було визначено показники якості класифікації, наведені в табл. 14.

Таблиця 14  
Показники якості класифікації

	Пере- вірка 2	Пере- вірка 3	Пере- вірка 4	Пере- вірка 5
Accuracy, %	90,48	100	92	92,86
Micro Precision, %	66,67	100	80	85,71

### Висновки

Метою виконання та обробки експерименту була перевірка ефективності використання запропонованого методу класифікації технічного стану в умовах заводських випробувань на різних режимах роботи, виявлення основних особливостей його діагностування, визначення необхідних конструктивних параметрів для діагностування, дослідження особливостей застосування та обмежень методу.

Розроблений метод діагностування тестувався на практиці в процесі вхідного контролю семи екземплярів гідромеханічного паливного регулятора. За результатами виконано оцінку ефективності класифікації станів.

Метод діагностування продемонстрував різні показники якості класифікації на різних режимах роботи. На деяких режимах він добре локалізував несправності, але в інших випадках, особливо в тих, де діагностувалися конструктивні параметри, дуже схожі за своїм впливом на діагностичні ознаки, метод давав хибні результати. Так, для перевірки 2 метод дав 100 % правильних оцінок. Однак для перевірки 1, у якій діагностується той же перелік конструктивних параметрів, значення мікро-усередненої точності склало 67 %, оскільки метод помилково класифікував дефект для одного агрегату з трьох.

При виборі конструктивних параметрів, що діагностуються, для перевірок 3 і 4 було прийнято рішення про об'єднання класів дефектів з високою кореляцією в один клас, а завдання подальшої локалізації дефекту виконувати на ділянці технічного контролю відповідно до діючих технологічних процесів дефектації. Із завданням діагностування меншої кількості дефектів на перевірках 3 і 4, що наведені в таблицях 11, 12, метод справився досить добре, припустившись однієї помилки для кожної перевірки. Для перевірки 3 загальна точність класифікації становила 92 %, мікро-усереднена точність становила 80 %. Для перевірки 4 ті самі показники якості класифікації склали 92,86 % і 85,71 % відповідно.

Виходячи з аналізу отриманих результатів, причини виникнення помилкових оцінок методу діагностування можна поділити на два типи. Перший

тип помилок пов'язаний із високою кореляційною залежністю коефіцієнтів впливу конструктивних параметрів, що діагностуються, на діагностичні ознаки. Така залежність пояснюється тим, що низка конструктивних елементів у комплексі з іншими конструктивними елементами виконують одну функцію регулятора. Вирішення цієї проблеми класифікації технічного стану лежить у двох площинах. По-перше, це створення експертних діагностичних систем. У таких системах діагноз виноситься експертом на підставі інформації, отриманої за допомогою алгоритму класифікації, інформації від випробувальної ділянки та результатів огляду та дефектації деталей згідно з картами технологічного контролю. Для такої експертної системи допускається зменшення глибини локалізації несправностей в оцінці технічного стану об'єкта за допомогою методу діагностування.

Другою проблемою методу діагностування є точність ідентифікації діагностичної математичної моделі. Усі помилки в оцінці технічного стану були зумовлені неточністю ідентифікації. У цій роботі було застосовано досить простий алгоритм ідентифікації за однією діагностичною ознакою. Тому одним з основних напрямків щодо подальшого поліпшення методу діагностування технічного стану гідравлічних агрегатів є розробка ефективного методу ідентифікації діагностичної математичної моделі.

Загалом метод класифікації технічного стану паливного регулятора в просторі параметрів робочого процесу показав високу ефективність та виявився корисним інструментом для реалізації технології вхідного контролю параметрів під час ремонту за технічним станом на підприємстві. Інтеграція методу в технологію вхідного контролю дозволила систематизувати процедуру діагностування, забезпечити повторюваність і об'єктивність оцінок технічного стану, а також зменшити залежність результатів від людського фактора. Використання розробленого методу може сприяти підвищенню ефективності ремонту за технічним станом, дозволяючи більш точно планувати ремонтні роботи та оптимізувати використання ресурсів.

**Внесок авторів:** формулювання проблеми – **С. В. Спіфанов**; розробка методики проведення експериментального дослідження – **І. В. Оганян**; розробка методу класифікації станів – **І. В. Оганян**, **С. В. Спіфанов**; виконання та обробка результатів експериментальних досліджень – **І. В. Оганян**; аналіз результатів та формування висновків – **С. В. Спіфанов**, **І. В. Оганян**.

Усі автори прочитали та погодилися з опублікованою версією рукопису.

### Конфлікт інтересів

Автори заявляють, що у них немає конфлікту інтересів щодо цього дослідження, фінансового, особистого, авторського чи іншого, який міг би вплинути на дослідження та його результати, представлені в цій статті.

### Фінансування

Дослідження проводилося без фінансової підтримки.

### Доступність даних

Рукопис не має пов'язаних даних.

### Використання штучного інтелекту

Автори підтверджують, що не використовували технології штучного інтелекту при створенні представленої роботи.

Усі автори прочитали та погодилися з опублікованою версією рукопису.

### Література

1. Оганян, І. В. Математична модель паливного насоса-регулятора турбовального двигуна вертольота [Текст] / І. В. Оганян // *Авіаційно-космічна техніка та технологія*. – 2020. – № 7 (167). – С. 105–112. DOI: 10.32620/akt.2020.7.15.
2. Оганян, І. В. Алгоритм класифікації технічного стану паливного регулятора у просторі параметрів робочого процесу [Текст] / І. В. Оганян, & С. В. Єпіфанов // *Авіаційно-космічна техніка та технологія*. – 2021. – № 4 (173). – С. 158–169. – DOI: 10.32620/akt.2021.4sup1.22.
3. Balayla, J. Bayesian updating and sequential testing: overcoming inferential limitations of screening tests [Text] / J. Balayla // *BMC Medical Informatics and Decision Making*. – 2022. – Vol. 22, iss. 6. DOI: 10.1186/s12911-021-01738-w.
4. Holman, J. P. *Experimental Methods for Engineers* [Text] / J. P. Holman. – McGraw-Hill Series in Mechanical Engineering, 2012. – 761 p.
5. Ільченко, Б. С. Діагностування функціонально-технічного стану газо-перекачувальних агрегатів [Текст] : монографія / Б. С. Ільченко; - Харків : Харк. нац. акад. міськ. госп-ва. ХНАМГ, 2011. – 228 с.
6. Синтез систем управління и диагностирования газотурбинных двигателей [Текст] / С. В. Епифанов [та ін.]. – Київ : Техніка, 1998. – 311 с.
7. Johnson, R. A. *Applied Multivariate Statistical Analysis* [Text] / R. A. Johnson, & D. W. Wichern. – Prentice-Hall, 2002. – 788 p.

8. Ідентифікація математичної моделі авіаційного ГТД за польотними даними [Текст] / О. С. Якушенко, П. В. Корольов, В. Є. Мільцов, О. І. Чумак, & В. М. Охмакевич // *Вестник двигателестроения*. – 2014. – № 2. – С. 130-138.

9. Jiang, X. Bayesian cross-entropy methodology for optimal design of validation experiments [Text] / X. Jiang, S. Mahadevan // *Measurement Science and Technology*. – 2006. – Vol. 17. – P. 1895–1908. DOI: 10.1088/0957-0233/17/7/031.

10. Ballabio, D. Multivariate comparison of classification performance measures [Text] / D. Ballabio, F. Grisoni, & R. Todeschini // *Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems*. – 2018. – Vol. 174. – P. 33–44. – DOI: 10.1016/j.chemolab.2017.12.004.

11. Confidence interval for micro-averaged F1 and macro-averaged F1 scores [Text] / K. Takahashi, K. Yamamoto, A. Kuchiba, & T. Koyama // *Applied Intelligence*. – 2022. – Vol. 52. – P. 4961–4972. – DOI: 10.1007/s10489-021-02635-5.

### References

1. Ohanian, I. V. Matematychna model palyvnoho nasosa-rehuliatora turbovalnoho dvyhuna vertolota [Mathematical model of fuel pump-regulator of helicopter turbo-shaft engine]. *Aviacijno-kosmicna tehnika i tehnologia – Aerospace technic and technology*, 2020, no. 7 (167), pp. 105–112. DOI: 10.32620/akt.2020.7.15. (in Ukrainian).
2. Ohanian, I. V., & Yepifanov, S. Alhorytm klasyfikatsii tekhnichnoho stanu palyvnoho rehuliatora u prostori parametriv robochoho protsesu [Algorithm for classifying the technical stage of the firing regulator within the scope of operating process parameters]. *Aviacijno-kosmicna tehnika i tehnologia – Aerospace technic and technology*, 2021, no. 4 (173), pp. 158–169. DOI: 10.32620/akt.2021.4sup1.22. (in Ukrainian).
3. Balayla, J. Bayesian updating and sequential testing: overcoming inferential limitations of screening tests. *BMC Medical Informatics and Decision Making*, 2022, vol. 22, iss. 6. DOI: 10.1186/s12911-021-01738-w.
4. Holman, J. P. *Experimental Methods for Engineers*. McGraw-Hill Series in Mechanical Engineering, 2012. 761 p.
5. Ільченко, Б. С. *Діагностування функціонально-технічного стану газо-перекачувальних агрегатів: монографія* [Diagnosis of the functional and technical plant of gas pumping units: monograph]. Kharkiv, Khark. nats. akad. misk. hosp-va. KhNAMH, 2011. 228 p. (in Ukrainian).
6. Yepifanov, S. V., & et al. *Sintez sistem upravleniya i diagnostirovaniya gazoturbinnyx dvigatelej* [Synthesis of control systems and diagnostics of gas turbine engines]. Kyiv, Publ. «Tehnika», 1998. 311 p. (in Russian).
7. Johnson, R. A., Wichern, D. W. *Applied Multivariate Statistical Analysis*. Prentice-Hall, 2002. 788 p.

8. Yakushenko, O. S., Korolov, P. V., Miltsov, V. Ye., Chumak, O. I., & Okhmakevych V. M. Identyfikatsiya matematychnoyi modeli aviatsiynoho HTD za pol'otnymy danymy [Identification of aviation gas turbine engine mathematical model by operational data]. *Vestnik dvigatelestroyeniya - Bulletin of Engine Building*, 2014, no. 2, pp. 130-138. (in Ukrainian).
9. Jiang, X., & Mahadevan, S. Bayesian cross-entropy methodology for optimal design of validation experiments. *Measurement Science and Technology*, 2006, vol. 17, iss. 7, pp. 1895–1908. DOI: 10.1088/0957-0233/17/7/031.
10. Ballabio, D., Grisoni, F., & Todeschini, R. Multivariate comparison of classification performance measures. *Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems*, 2018, vol. 174, pp. 33-44. DOI: 10.1016/j.chemolab.2017.12.004.
11. Takahashi, K., Yamamoto, K., Kuchiba, A., & Koyama, T. Confidence interval for micro-averaged F1 and macro-averaged F1 scores. *Applied Intelligence*, 2022, vol. 52, pp. 4961-4972. DOI: 10.1007/s10489-021-02635-5.

Надійшла до редакції 08.12.2024, розглянута на редколегії 17.03.2025

## VERIFICATION OF THE METHOD FOR CLASSIFYING THE TECHNICAL STATE OF A TURBOSHAFT ENGINE FUEL REGULATOR IN THE SPACE OF OPERATIONAL PROCESS PARAMETERS UNDER FACTORY TEST CONDITIONS

*Ihor Ohanian, Sergiy Yepifanov*

The article presents the results of verifying the method for classifying the technical state of a helicopter turboshaft engine fuel regulator in the parameter space of the operational process under real factory-testing conditions. The applied diagnostic method is based on a mathematical model of the fuel regulator, considering the impact of deviations in structural parameters on diagnostic features. In this study, structural parameters subject to diagnostics were identified for each test, and parameters with high correlation coefficients in terms of their impact on diagnostic features were excluded. The necessity of the mathematical model identification of the regulator for applying the technical state classification method was substantiated. A method of single-factor identification of the fuel regulator's mathematical model, based on the working-fluid pressure measurements before the equivalent resistance of the first nozzle circuit, is described. The procedure for classifying the technical state was conducted in two stages: determining the conditional probabilities of the current regulator state (S) belonging to one of the modeled defects using Bayes' theorem, and establishing a diagnosis based on the maximum value of these probabilities. The study was conducted at JSC "FED" on seven hydromechanical fuel regulators. During the tests, the primary malfunctions were identified based on controlled parameters, and the states of the regulators were classified using the proposed method. The effectiveness of the method was analyzed according to quantitative classification quality indicators: the overall accuracy ranged from 90.48% to 100%, and micro-averaged precision ranged from 66.67% to 100%, depending on the specific test. It was determined that the method demonstrates high efficiency in most operational modes; however, its accuracy depends on the degree of correlation between the diagnosed structural parameters and the precision of the mathematical model identification. Recommendations for further improvement of the method include using expert systems and developing effective model identification algorithms. The method can be recommended for integration into production technologies for condition-based maintenance to improve diagnostic accuracy and optimize repair activities.

**Keywords:** fuel regulator; technical state; diagnostic method; classification; fault localization; defect; experiment; classification quality; overall classification accuracy; micro-averaged classification precision.

**Оганян Ігор Валерійович** – інженер-конструктор АТ «ФЕД»; асп. каф. конструкції та міцності авіаційних двигунів та енергетичних установок, Національний аерокосмічний університет ім. М. С. Жуковського «Харківський авіаційний інститут», Харків, Україна.

**Спіфанов Сергій Валерійович** – д-р техн. наук, проф., зав. каф. конструкції авіаційних двигунів, Національний аерокосмічний університет ім. М. С. Жуковського «Харківський авіаційний інститут», Харків, Україна.

**Ihor Ohanian** – Lead Mechanical 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 the 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.