

<sup>1</sup>Стьопушкіна О. П.,<sup>2</sup>Попов О. В.,<sup>2</sup>Вознюк А. П.

## ВИЗНАЧЕННЯ МНОЖИНИХ ВІДМОВ ПРОТОЧНОЇ ЧАСТИНИ ТРДД ЗА ТЕРМОГАЗОДИНАМІЧНИМИ ПАРАМЕТРАМИ

<sup>1</sup> Інститут комп'ютерних технологій Національного авіаційного університету  
<sup>2</sup> Аерокосмічний інститут Національного авіаційного університету

*Побудована експертна модель визначення множинних відмов в авіаційному двигуні АІ-25. Представлена логіко-лінгвістична модель визначення множинних відмов в АД АІ-25. Алгоритм пошуку множинних відмов в АД АІ-25 реалізовано в середовищі C++Builder.*

Діагностика проточної частини авіаційного двигуна (АД) по термогазодинамічним параметрам (ТГДП) заснована на аналізі тенденцій відхилення параметрів, діагностичних ознак (коефіцієнту корисної дії вузлів, моментних характеристик, постійної часу, ковзання роторів, ступені підвищення або зниження тиску, коефіцієнтів втрат повного тиску), спеціальних параметрів (часу вибігу роторів, забросу температури під час запуску, часу переключення реверсу, часу спрацьовування механізації компресора) та оцінки їх відхилень, обумовлених розвитком несправностей. Цей метод дозволяє знаходити прогари, викривлення жарових труб камер згорання і соплових апаратів турбін, залишкові деформації, корозійні і ерозійні пошкодження лопаток газогенератора, руйнування елементів протипомпажних систем, забруднення проточної частини і інші несправності.

Багато елементів конструкції газотурбінних двигунів (ГТД) (робочі лопатки, диски, вали роторів і ін.) працюють в умовах теплових і силових навантажень, а також експлуатаційних факторів, які викликають накопичення в матеріалі деталі прихованих пошкоджень, що призводять до виникнення макроскопічних тріщин. Розсіяні пошкодження, що виникають, неможливо знайти візуально і достовірно оцінити за допомогою якого-небудь методу не руйнуючого контролю у зв'язку з тим, що стадія накопичення прихованих пошкоджень до появи тріщин, які можна побачити, складає 90% від часу до повно-

го руйнування. В таких ситуаціях виникають множинні відмови, для виявлення яких необхідно застосовувати якісно нові методи діагностики. Застосування існуючих автоматизованих систем визначення технічного стану елементів конструкції вузлів проточної частини авіаційного двигуна за параметрами, що реєструються в експлуатації, не має об'єктивного відображення стану вузла, а рішення приймає оператор. В першу чергу, це пов'язано з недостатньою кількістю діагностичних ознак, в друге, необхідно розробляти нові діагностичні моделі, які б мали можливість зменшити площину невизначеності при накладанні класів стану вузлів діагностування.

Ідентифікація множинних відмов в авіаційних двигунах вимагає застосування нетрадиційних методів діагностики, подібних тим, які використовуються в експертних системах. Такі методи передбачають наявність логіко-лінгвістичних моделей, що відображають причинно-наслідкові зв'язки між параметрами і характеристиками стану авіаційного двигуна, а також алгоритмів логічного виведення шуканого результату на основі аналізу цих моделей [1].

Задача встановлення множинних відмов носить комбінаторний характер, тому для її розв'язку можуть бути застосовані методи комбінаторного аналізу, що вимагає побудови алгебраїчних форм, адекватних логіко-лінгвістичним моделям (ЛЛІМ) діагностики. Характерною особливістю застосування ЛЛІМ є наявність

бази знань та бази даних. Тому автори проводять дослідження на встановлення більш широкого діапазону зв'язків між справним і несправним станами АД. Для більш детального дослідження впливу експлуатаційних пошкоджень на діагностичні ознаки стану проточної частини ГТД були використані значення ТГДП натурного експерименту на сталих режимах, які наведені в роботі [2]. Задача діагностування авіаційного двигуна формулюється таким чином: виходячи з поточних значень характеристик стану авіаційного двигуна, визначити підсистеми, в яких відбулися відмови, і види цих відмов. Введемо наступні позначення:  $m$  – кількість взаємодіючих підсистем АД; в кожній підсистемі АД можуть відбуватися відмови  $n_i$  видів.

Стан АД в деякий момент часу визначається вектором значень його характеристик  $z^* = (z_p^*, p = \overline{1, u})$ . Нехай  $e_p$  – еталонний рівень  $p$ -ї характеристики стану АД;  $\varepsilon_p$  – допустиме відхилення, а  $\delta_p$  – фактичне відхилення поточного значення цієї характеристики від еталонного:  $\delta_p = |z_p^* - e_p|, p = \overline{1, u}$ . Якщо для всіх характеристик стану АД виконується умова  $\delta_p \leq \varepsilon_p$ , можна стверджувати, що АД знаходиться у нормальному стані, в протилежному випадку – в аномальному (несправному, непрацездатному). Експертну модель діагностування АД, в якій можливі множинні відмови, побудуємо по наступній схемі, запропонованій в роботі [3]:

<елементарна відмова>  $\rightarrow$  <зміна значень набору характеристик стану АД>.

Передбачається, що зміна значення кожної характеристики оцінюється по відношенню до наперед відомого еталонного рівня. Допускається що у разі неможливості кількісного вимірювання тієї або іншої характеристики стану АД вона може бути задана на якісному рівні. Експертна модель діагностування АД має наступну структуру:

$$X_j(\sigma_i) \rightarrow \bigwedge_{p \in P_{ij}} D(z_p, h_{pij}), i = \overline{1, m}; j = \overline{1, n}, (1)$$

де  $D(z_p, h_{pij})$  – предикат, що відображає зміну значення характеристики  $z_p$  стану АД на величину  $h_{pij}$  по відношенню до еталонного рівня в результаті виникнення відмови  $j$ -ого виду в  $i$ -ій підсистемі;  $P_{ij}$  – множина номерів характеристик стану АД, що змінюють свої значення під впливом відмови  $j$ -ого виду в  $i$ -ій підсистемі.

Трансформуємо логіко-лінгвістичну модель (1) у відповідну алгебраїчну форму:

$$\begin{cases} \sum_{i \in I_p} \sum_{j \in J_{pi}} x_{ij} (h_{pij} - \xi_{pij}) \leq \delta_p \\ \sum_{i \in I_p} \sum_{j \in J_{pi}} x_{ij} (h_{pij} + \xi_{pij}) \geq \delta_p \end{cases}; p = \overline{1, u}, (2)$$

де  $x_{ij}$  – булева змінна, поставлена у відповідність логічному вислову  $X_j(\sigma_i)$ , що описує відмову  $j$ -ого виду в  $i$ -ій підсистемі АД;  $x_{ij} \in \{0, 1\}$ ,  $i = \overline{1, m}$ ,  $j = \overline{1, n_i}$ ;  $I_p$  – множина підсистем АД, відмови в яких призводять до зміни значення характеристики  $z_p$ :  $I_p = \{i : 1 \leq i \leq m; J_{pi} \neq \emptyset\}$ ;

$J_{pi}$  – множина видів відмов в  $i$ -ій підсистемі АД, що призводить до зміни значення характеристики  $z_p$ ;  $\xi_{pij}$  – допустиме розузгодження між фактичним і передбаченим експертною моделлю (1) відхиленням значення характеристики  $z_p$ , викликаним виникненням відмови  $j$ -ого виду в  $i$ -ій підсистемі АД.

Задача визначення множинних відмов в АД на основі експертної моделі (1) зводиться до відшукування вектора значень змінних  $(x_{ij}; i = \overline{1, m}, j = \overline{1, n_i})$ , задовольняючих системі нерівностей (2) і умові бівалентності. Значення шуканих змінних інтерпретується таким чином: якщо в результаті рішення системи (2) змінна  $x_{i^* j^*}$  приймає значення 1, це означає, що в  $i^*$ -ій підсистемі АД відбулася відмова  $j^*$ -ого

виду; при  $x_{i,j}^{*} = 0$  дане твердження невірне. Бівалентність шуканих змінних, що входять в систему нерівностей (2), дає можливість використовувати для її вирішення метод спрямованого перебору варіантів, адаптований під структуру приведених математичних виразів.

Апробація запропонованого підходу локалізації несправностей проводилась на прикладі двигуна AI-25. Для даного двигуна характеристиками стану можна вважати наступні діагностичні ознаки:  $z_1$  – коефіцієнт корисної дії (ККД) компресору низького тиску (КНТ);  $z_2$  – ККД компресору високого тиску (КВТ);  $z_3$  – ступінь підвищення тиску КНТ;  $z_4$  – ступінь підвищення тиску КВТ;  $z_5$  – ККД турбіни високого тиску (ТВТ);  $z_6$  – ККД турбіни низького тиску (ТНТ);  $z_7$  – ступінь зниження тиску ТНТ;  $z_8$  – постійна часу ротора низького тиску;  $z_9$  – постійна часу ротора високого тиску;  $z_{10}$  – коефіцієнт підсилення ротора низького тиску по витраті палива;  $z_{11}$  – коефіцієнт підсилення ротора високого тиску по витраті палива;  $z_{12}$  – ковзання роторів низького і високого тиску;  $z_{13}$  – коефіцієнт підсилення ротора низького тиску по обертам ротора високого тиску;  $z_{14}$  – коефіцієнт підси-

лення ротора високого тиску по обертам ротора низького тиску.

До несправностей, пошкоджень елементів конструкції вузлів проточної частини ГТД в експлуатації слід віднести наступні: корозія, ерозія, прогар, відкладення продуктів горіння на лопатках соплових апаратів і робочих лопатках турбіни. В цілому це призводить до зміни якості поверхні, тому в даному конкретному випадку моделювання стану проточної частини газодинамічного стенду на базі AI-25 будемо вважати за несправність зміну шорсткості поверхні по відношенню до різних вузлів ( $X$ ). В якості підсистем (вузлів) АД стосовно ТРДД AI-25 розглядаються можливі місця виникнення відмов (несправностей):  $\sigma_1$  – лопатки 1-ї ступені КНТ;  $\sigma_2$  – лопатки 1-ї ступені КВТ;  $\sigma_3$  – форсунки;  $\sigma_4$  – лопатки 2-ї ступені ТНТ. Зміну значень характеристик АД позначимо наступними символами:  $\downarrow$  – зменшення значення характеристики;  $\uparrow$  – збільшення значення характеристики. Після обробки даних експерименту, а саме термогазодинамічних параметрів робочого процесу в характерних перетинах проточної частини й проведення розрахунків, були отримані значення відхилень діагностичних ознак несправного стану двигуна, які наведені в таблиці 1.

Таблиця 1

Значення відхилень діагностичних ознак

	$Z_1$	$Z_2$	$Z_3$	$Z_4$	$Z_5$	$Z_6$	$Z_7$	$Z_8$	$Z_9$	$Z_{10}$	$Z_{11}$	$Z_{12}$	$Z_{13}$	$Z_{14}$
	$(\eta_{кн})$	$(\eta_{кв})$	$(\pi_{кн})$	$(\pi_{кв})$	$(\eta_{тв})$	$(\eta_{тн})$	$(\pi_{тн})$	$T_{G\Pi}^{HT}$	$T_{G\Pi}^{BT}$	$K_{G\Pi}^{HT}$	$K_{G\Pi}^{BT}$	$S$	$K_{BT}^{HT}$	$K_{HT}^{BT}$
$\sigma_1$	$-3,9 \cdot 10^{-3}$	$-5,9 \cdot 10^{-3}$	-0,072	-0,176	-0,1218	-0,0012	-0,1219	+0,369	-5,522	+0,0613	-0,336	+0,088	+0,2239	-0,0034
$\sigma_2$	$-7 \cdot 10^{-4}$	-0,0112	-0,017	-0,318	-0,108	0,0071	+0,252	+0,02	+0,665	+0,014	-0,6037	-0,044	+0,0493	-0,0062
$\sigma_3$	$-1,1 \cdot 10^{-3}$	$-2 \cdot 10^{-4}$	-0,026	-0,0065	+0,074	+0,002	-0,0419	+0,154	-0,02	+0,022	-0,01259	+0,042	+0,0779	$-1 \cdot 10^{-5}$
$\sigma_4$	$+5 \cdot 10^{-4}$	$+1,1 \cdot 10^{-3}$	+0,013	+0,035	+0,078	-0,0026	-0,0762	-0,0811	-2,16	-0,0114	+0,0682	-0,013	-0,0391	$+1 \cdot 10^{-4}$

З урахуванням введених позначень, експертну модель визначення множинних відмов в АД AI-25, побудовану за запро-

понованою схемою, можна представити в наступному вигляді:

$$X(\sigma_1) \rightarrow D(z_1, \downarrow) \wedge D(z_2, \downarrow) \wedge D(z_3, \downarrow) \wedge D(z_4, \downarrow) \wedge D(z_5, \downarrow) \wedge D(z_6, \downarrow) \wedge D(z_7, \downarrow) \wedge D(z_8, \uparrow) \wedge D(z_9, \downarrow) \wedge D(z_{10}, \uparrow) \wedge D(z_{11}, \downarrow) \wedge D(z_{12}, \uparrow) \wedge D(z_{13}, \uparrow) \wedge D(z_{14}, \downarrow);$$

$$X(\sigma_2) \rightarrow D(z_1, \downarrow) \wedge D(z_2, \downarrow) \wedge D(z_3, \downarrow) \wedge D(z_4, \downarrow) \wedge D(z_5, \downarrow) \wedge D(z_6, \downarrow) \wedge D(z_7, \uparrow) \wedge D(z_8, \uparrow) \wedge D(z_9, \uparrow) \wedge D(z_{10}, \uparrow) \wedge D(z_{11}, \downarrow) \wedge D(z_{12}, \downarrow) \wedge D(z_{13}, \uparrow) \wedge D(z_{14}, \downarrow);$$

$$X(\sigma_3) \rightarrow D(z_1, \downarrow) \wedge D(z_2, \downarrow) \wedge D(z_3, \downarrow) \wedge D(z_4, \downarrow) \wedge D(z_5, \uparrow) \wedge D(z_6, \uparrow) \wedge D(z_7, \downarrow) \wedge D(z_8, \uparrow) \wedge D(z_9, \downarrow) \wedge D(z_{10}, \uparrow) \wedge D(z_{11}, \downarrow) \wedge D(z_{12}, \uparrow) \wedge D(z_{13}, \uparrow) \wedge D(z_{14}, \downarrow);$$

$$X(\sigma_4) \rightarrow D(z_1, \uparrow) \wedge D(z_2, \uparrow) \wedge D(z_3, \uparrow) \wedge D(z_4, \uparrow) \wedge D(z_5, \uparrow) \wedge D(z_6, \downarrow) \wedge D(z_7, \downarrow) \wedge D(z_8, \downarrow) \wedge D(z_9, \downarrow) \wedge D(z_{10}, \downarrow) \wedge D(z_{11}, \uparrow) \wedge D(z_{12}, \downarrow) \wedge D(z_{13}, \downarrow) \wedge D(z_{14}, \uparrow).$$

Але, якщо проаналізувати суттєвість пошкодження, то отримаємо наступну картину зміни діагностичних ознак при впливі тину (таблиця 2).

Таблиця 2

Якісний вплив несправності на зміну діагностичних ознак

	Z <sub>1</sub>	Z <sub>2</sub>	Z <sub>3</sub>	Z <sub>4</sub>	Z <sub>5</sub>	Z <sub>6</sub>	Z <sub>7</sub>	Z <sub>8</sub>	Z <sub>9</sub>	Z <sub>10</sub>	Z <sub>11</sub>	Z <sub>12</sub>	Z <sub>13</sub>	Z <sub>14</sub>
	(η <sub>кн</sub> )	(η <sub>кв</sub> )	(π <sub>кн</sub> )	(π <sub>кв</sub> )	(η <sub>тв</sub> )	(η <sub>тн</sub> )	(π <sub>тн</sub> )	T <sub>GII</sub> <sup>HT</sup>	T <sub>GII</sub> <sup>BT</sup>	K <sub>GII</sub> <sup>HT</sup>	K <sub>GII</sub> <sup>BT</sup>	S	K <sub>BT</sub> <sup>HT</sup>	K <sub>HT</sub> <sup>BT</sup>
σ <sub>1</sub>	-	-	+	+	+	-	+	+	+	+	+	+	+	-
σ <sub>2</sub>	-	-	-	+	+	-	+	+	-	+	+	+	+	+
σ <sub>3</sub>	-	-	+	-	+	-	+	+	-	+	-	+	+	-
σ <sub>4</sub>	-	-	-	-	+	-	+	+	+	+	-	-	+	-

Тоді, з урахуванням вищеведеного, експертна модель приймає вигляд:

$$X(\sigma_1) \rightarrow D(z_3, \downarrow) \wedge D(z_4, \downarrow) \wedge D(z_5, \downarrow) \wedge D(z_7, \downarrow) \wedge D(z_8, \uparrow) \wedge$$

$$\wedge D(z_9, \downarrow) \wedge D(z_{10}, \uparrow) \wedge D(z_{11}, \downarrow) \wedge D(z_{12}, \uparrow) \wedge D(z_{13}, \uparrow);$$

$$X(\sigma_2) \rightarrow D(z_4, \downarrow) \wedge D(z_5, \downarrow) \wedge D(z_7, \uparrow) \wedge D(z_8, \uparrow) \wedge$$

$$\wedge D(z_{10}, \uparrow) \wedge D(z_{11}, \downarrow) \wedge D(z_{12}, \downarrow) \wedge D(z_{13}, \uparrow) \wedge D(z_{14}, \downarrow);$$

$$X(\sigma_3) \rightarrow D(z_3, \downarrow) \wedge D(z_5, \uparrow) \wedge D(z_7, \downarrow) \wedge D(z_8, \uparrow) \wedge D(z_{10}, \uparrow) \wedge D(z_{12}, \uparrow) \wedge D(z_{13}, \uparrow);$$

$$X(\sigma_4) \rightarrow D(z_5, \uparrow) \wedge D(z_7, \downarrow) \wedge D(z_8, \downarrow) \wedge D(z_9, \downarrow) \wedge D(z_{10}, \downarrow) \wedge D(z_{13}, \downarrow).$$

Представленій експертній моделі ставиться у відповідність система алгебраїчних нерівностей (2). Структура даної системи лінійна, але мультимодулярна. Бівалентність шуканих змінних дає можливість використати для розв'язку системи нерівностей (2) метод спрямованого перебору варіантів. Алгоритм пошуку множинних відмов в авіаційному двигуні АІ-25 на основі запропонованої логіколінгвістичної моделі реалізовано в середовищі C++Builder.

### Список літератури

1. Литвиненко О. Є. Математичний метод визначення множинних відмов в складних технічних системах. – Вісник НАУ, 2002. – №4. – С. 143-150.

2. Шаабдиев С. Ш. Диагностирование проточной части турбореактивного двухконтурного двигателя на переходных режимах его работы. Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. – Харьков: ХАИ, 2000. – 151 с.

3. Дмитриев С. А., Литвиненко А. Е., Степушкина Е. П., Попов А. В. Экспертные модели определения множественных отказов в авиационных двигателях. Вісник двигунобудування, 2005. – №1. – С. 12-17.