

## **СЕКЦІЯ 2**

### **НАВІГАЦІЯ, ТЕХНІЧНА ЕКСПЛУАТАЦІЯ ПОВІТРЯНИХ СУДЕН**

УДК 629.735

**Сергій Ігорович Владов,**

*кандидат технічних наук,*

*Кременчуцький льотний коледж ХНУВС*

**Юрій Миколайович Шмельов,**

*кандидат технічних наук,*

*Кременчуцький льотний коледж ХНУВС*

**Курбан Рамазанович Курбанов,**

*Професор Кременчуцького льотного коледжу ХНУВС*

#### **ЩОДО ПИТАННЯ КОНТРОЛЮ І ДІАГНОСТИКИ ТЕХНІЧНОГО СТАНУ авіаційного двигуна ТВ3-117 У польотних режимах ЗА ДОПОМОГОЮ НЕЧІТКОЇ ЕКСПЕРТНОЇ СИСТЕМИ**

Застосування експертних систем (ЕС) значно підвищує ефективність діагностики авіаційного двигуна ТВ3-117 [1, 2], оскільки дозволяє оперативно аналізувати різноманітну інформацію про особливості польотної ситуації, виробляти необхідні рекомендації про можливість усунення тієї або іншої несправності, враховувати нелінійність і невизначений характер протікають в них процесів і приймати оптимальні рішення по експлуатації даного двигуна.

Одним з перспективних способів підвищення ефективності функціонування сучасних систем діагностики є впровадження нових інформаційних комп'ютерних технологій, що базуються на «м'яких» обчисленнях: нечіткої логіки (НЛ), нейронних мережах (НС), генетичних алгоритмах (ГА), з адаптацією цих технологій в середовищі гібридних динамічних ЕС, що дозволяє їм за рівних обчислювальних можливостях із звичайною ЕС охоплювати більш широкий спектр вирішуваних завдань.

ЕС діагностики співвідносять спостерігаються порушення поведінки системи з котрі зумовили їх причинами, спираючись на один з двох наступних методів. Перший має на увазі використання якоїсь таблиці асоціативних зв'язків між типами поведінки систем

і діагнозами. У другому методі спільне використання знань про те, як влаштована система, і знань про слабкі місця конструкції або використовуваних деталей дозволяє робити припущення про несправності, сумісних з спостерігаються даними [3].

Обчислювальна потужність ЕС визначається, в першу чергу, нарощує базою знань (БЗ), в якій зберігаються еталонні дані, що описують розглянуту область, і правила, що описують цілеспрямоване перетворення даної галузі. Сучасні гібридні діагностичні ЕС [3] дозволяють оперувати нечіткими визначеннями, дозволяючи більш ефективно використовувати і зберігати отримані знання, полегшуючи процес їх придбання, а система в цілому стає більш гнучкою.

Мобільність ЕС обумовлена мобільністю БЗ і можливістю її поповнення з різних інформаційних складових (баз даних (БД), баз експертних знань (БЕЗ), баз концептуальних знань (БКЗ), динамічних файлів тощо), а також різними процедурами виведення. Конкретизація знань при розв'язанні задач діагностики декомпозує їх на точні і неточні, повні і неповні, статичні і динамічні, однозначні і багатозначні тощо. Крім того, самі експертні знання неточні в силу їх суб'єктивного характеру. Приблизність і багатозначність знань призводять до того, що ЕС має справу як би не з однією, а з кількома альтернативними областями. Тому неповнота знань дозволяє використовувати не одне, а кілька джерел знань, що особливо актуально при експлуатації авіаційного двигуна ТВ3-117, який вимагає залучення інтелектуальних систем, здатних ефективно локалізувати відмову, усунути несправність, здійснити настрійку (регулювання) параметрів і прогноз поточного стану (ресурсу) тощо.

При створенні ЕС діагностики і контролю і діагностики технічного стану авіаційного двигуна ТВ3-117 було враховано низку особливостей, пов'язаних:

- з досліджуванним об'єктом (кількість діагностованих і контрольованих параметрів, адаптація моделі (точність, допущення), помилки вимірювань);

- з архітектурою ЕС (взаємодія інформаційних потоків, організація баз даних (БД) і знань (БЗ) (баз концептуальних та експертних знань));

- з адаптацією «м'яких» обчислень в середовищі ЕС і її підсистем;

– з рівнем кваліфікації користувача при вирішенні поставлених перед ними завдань.

В основі ідеології розробленої експертної контролю і діагностики технічного стану авіаційного двигуна ТВ3-117 лежить використання методу FDI (Fault Detection and Identification), заснованого на порівнянні результатів вимірювань газодинамічних параметрів реального двигуна з розрахунковими параметрами, обчисленими по його математичній моделі [4].

Компонентна математична модель нечіткої експертної системи в узагальненому вигляді може бути представлена:

$$Z_{\xi,k}^*(t) = P_{\xi,k} \left( Z_{\xi}(t), R_k, Q_k, S_k, T_k \right); \quad (1)$$

де  $Z_{\xi,k}^*(t)$  – вектор вихідних параметрів, обчислених за ком-

понентною математичною моделлю двигуна;  $Z_{\xi}(t)$  – вектор вхі-

дних впливів, що задає режим роботи двигуна,  $\xi = \overline{1, \varepsilon}$ ;  $R_k = \{R_1, R_2, \dots, R_k\}$  – компонент, що входять до складу математичної моделі двигуна і знаходяться в концептуальній БЗ експертних систем, що характеризуються  $k$ -м поєднанням в узагальненій семантичній ме-

режі,  $k = \overline{1, K}$ ;  $Q_k$  – оператор перетворення вектору вхідних впливів у вектор вихідних параметрів, що розраховуються за обчислювальною моделлю;  $S_k$  – рівняння зв'язку для побудови компонентної моделі (визначення сполучних змінних окремих компонент);  $T_k$  – тривалість функціонування.

Нечітка експертна система здійснює процес контролю і діагностики авіаційного двигуна ТВ3-117 на основі декількох методик, реалізованих і адаптованих в її середовищі. Алгоритм полягає в наступному: нехай множина  $\{Y\}$  можливих технічних станів двигуна

характеризується підмножинами  $y_j \in Y$  еталонних векторів діаг-

ностичних ознак  $F_{l_i}$  ( $j$  – порядковий номер технічного стану;  $i$  –

порядковий номер еталонного вектору технічного стану:  $F_{l_i} \in Y$

, де  $i = 1 \dots N$  – загальне число еталонних векторів, що складають безліч технічних станів двигуна  $Y$ ).

Передбачається, що узагальнена лінійна функція, що розділяє одну з підмножин  $y_j$  технічного стану авіаційного двигуна ТВ3-117 від сукупності всіх інших підмножин його технічного стану, має вигляд:

$$L_j = \sum_{n=1}^N d_{n_j} f(F_l, F_{l_n}); \quad (2)$$

$$d_{n_j} = \begin{cases} 1, \text{ якщо } F_{l_n} \in y'_j \\ -1, \text{ якщо } F_{l_n} \notin y'_j \end{cases}, \quad f(F_l, F_{l_n}) = e^{-\left(\|F_l - F_{l_n}\|\right)^2},$$

де

$y'_j \in y'$  – редуцирована множина технічних станів двигуна, отримана з початкової множини  $Y$  шляхом відбору його елементів (еталонних векторів  $F_{l_i}$ ) за наступним правилом вектору  $F_{l_i}$  з множини  $Y$  встановлюється однозначний йому вектор  $F_{l_n}$  множини  $y'$   $F_{l_i} \equiv F_{l_n}$  тільки в тому випадку, коли відмінна від нуля величина  $\tau_i$ , що розраховується за рекурентним співвідношенням:

$$\tau_i = \frac{1}{2} b_i \left\{ 1 - b_i \operatorname{sgn} \left( a(F_{l_{i-1}}) \right) \right\}; \quad (3)$$

$$\text{де } a(F_{l_{i-1}}) = a(F_{l_{i-2}}) + \tau_{i-1} e^{-\left(\|F_l - F_{l_{i-1}}\|\right)^2}, \quad aF_{l_1} = e^{-\left(\|F_l - F_{l_1}\|\right)^2},$$

$$b_i = \begin{cases} 1, \text{ якщо } F_{l_i} \in y'_j \\ -1, \text{ якщо } F_{l_i} \notin y'_j \end{cases},$$
$$\text{sgn}(aF_{l_{i-1}}) = \begin{cases} 1, \text{ якщо } a(F_{l_{i-1}}) > 0 \\ -1, \text{ якщо } a(F_{l_{i-1}}) \leq 0 \end{cases}.$$

Вирішальне правило розпізнавання  $j$ -го технічного стану авіаційного двигуна ТВ3-117 має вигляд:

- якщо  $L_j > 0$ , то вектор виміряних параметрів  $F_l$  відповідає  $j$ -му технічному стану двигуна;
- якщо  $L_j < 0$ , то вектор виміряних параметрів  $F_l$  не відповідає  $j$ -му технічному стану двигуна;
- якщо  $L_j = 0$ , то технічний стан двигуна не визначено.

Запропонований метод розв'язку контролю і діагностики авіаційного двигуна ТВ3-117 на основі FDI-методу передбачає, на відміну від існуючих класичних методів, що використовують жорсткі допуски на контрольовані і діагностовані параметри, а також жорсткі межі варіювання коефіцієнтів, що погоджує експериментальні та розрахункові дані на етапах локалізації дефектів у двигуні, застосовувати правила нечіткої логіки, засновані на адаптації розрахункової математичної моделі реальному двигуну з урахуванням конкретних зовнішніх умов, а також знань і досвіду експертів для прийняття правильних рішень про технічний стан двигуна. Пропонується елементи нечіткої логіки застосовувати спільно з такими класичними методами, як:

- метод діагностичних матриць (матриць Л.А. Урбана);
- варіювання коефіцієнтів параметрів стану двигуна, з метою мінімізації нев'язок між вимірюваними та розрахунковими параметрами двигуна.

Задача семантичної візуалізації, а також реконфігурації математичної моделі (зворотне доведення теорем, автоматичний синтез програм) в середовищі нечіткої експертної системи розв'язується на основі математичної моделі авіаційного двигуна ТВ3-117.

Математична модель, що описує технічний стан авіаційного двигуна ТВ3-117, налаштована на індивідуальний двигун з урахуванням розсіювання параметрів компресорних характеристик. Дана задача розв'язується в два етапи:

– пряма задача, для розв'язку якої використовується статистика характерних дефектів, що проявилися в процесі експлуатації даного двигуна, а також подібна статистика, отримана за адекватною математичною моделлю;

– обернена задача, розв'язок якої дозволяє за результуючим вектором відхилень (покомпонентне порівняння параметрів математичної моделі і вимірюваних даних зі штатних датчиків) прийняти рішення про фактичний технічний стан двигуна.

Для розв'язку задачі локалізації несправних модулів проточної частини авіаційного двигуна ТВ3-117 використовується метод діагностичних матриць, який встановлює зв'язки між відхиленнями вимірюваних термогазодинамічних параметрів робочого процесу і відхиленнями розрахункових конструктивних параметрів стану вузлів двигуна. Такі моделі можуть бути задані в векторній формі у вигляді:

$$\overline{\delta}_x = A^{-1} B \overline{\delta}_y; \quad (4)$$

де  $\overline{\delta}_x$  – вектор параметрів стану двигуна;  $\overline{\delta}_y$  – вектор діагностичних ознак, відносних відхилень вимірюваних параметрів двигуна;  $B$  і  $A$  – матриці коефіцієнтів, що дозволяють встановлювати кількісний взаємозв'язок зазначених параметрів на певних режимах роботи двигуна. Діагностична матриця конкретного двигуна на певному режимі являє собою таблицю чисельних значень коефіцієнтів  $a_{ij}$  і  $b_{ij}$ , що дозволяє за відхиленнями ряду вимірюваних параметрів  $\delta_{y_{ij}}$  визначати відхилення невимірюваних параметрів стану окремих вузлів  $\delta x_{ij}$ .

Таким чином, в рамках FDI-методу здійснюється настройка реконфігурованою математичною моделлю авіаційного двигуна ТВ3-117, що зберігається в базі концептуальних знань, на індивідуальний двигун, а застосування апарату нечіткої логіки на етапі прийняття рішення підвищує ефективність і якість прийнятих рішень. Причому удосконалення нечіткої експертної системи

математичним апаратом, що описує вузли авіаційного двигуна ТВ3-117, з використанням методів зрівнювання й найменших квадратів, може застосовуватися як оперативний засіб для аналізу технічного стану авіаційного двигуна ТВ3-1117, коли необхідно швидко і з меншими подробицями оцінити його технічний стан. Якщо необхідний більш докладний і повний аналіз оцінки стану двигуна з видачою експертної оцінки прийняття рішення, а також дерева міркувань, то в цьому випадку може застосовуватися розроблена нечітка експертна система, що видає рекомендації екіпажу повітряного судна.

#### **Список бібліографічних посилань**

1. Шмельов Ю. М., Владов С. І., Дерев'янка І. Г. Основні вимоги до експертної системи контролю та діагностики технічного стану авіаційного двигуна ТВ3-117 // *Авіація та космонавтика : матеріали X Всеукр. наук.-практ. конф. (м. Кривий Ріг, 16 квіт. 2019 р.). Кривий Ріг : КК НАУ, 2019. С. 67.*

2. Владов С. І., Плужник З. І. Щодо питання застосування експертних систем контролю та діагностики технічного стану авіаційного двигуна ТВ3-117 // *Авіація та космонавтика : матеріали XI Всеукр. наук.-практ. конф. (м. Кривий Ріг, 22 квіт. 2020 р.) Кривий Ріг, 2020. С. 40.*

3. Frank M. P., Ding S. X. Current developments in the theory of FDI. *Preprints of the 4th IFAC Symposium on Fault Detection Supervision and Safety for Technical Processes. 2000. Vol. 1. Pp. 16–27.*

4. Шмельов Ю. М., Владов С. І., Хебда А. С., Котляров К. Г. Застосування правил нечіткої логіки у задачі ідентифікації технічного стану авіаційного двигуна ТВ3-117. *Вчені записки Таврійського національного університету імені В. І. Вернадського. Серія: Технічні науки. 2018. Т. 30 (69), № 3. С. 34–40.*

*Одержано 30.04.2020*

