

Кравчук М. П.

# ДОСЛІДЖЕННЯ ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ КЛАСИФІКАЦІЇ ПОТОЧНОГО ТЕХНІЧНОГО СТАНУ ГАЗОТУРБІННИХ ДВИГУНІВ

Наведено структуру діагностування технічного стану газотурбінного двигуна (ГТД). Запропоновано метод навчання інтелектуальної автоматичної системи діагностування та реконфігурації керування (ІСАДРК) режимами роботи ГТД на базі інтеграції нечіткої логіки та нейромереж. Досліджено теоретично і експериментально можливості класифікації ІСАДРК поточного технічного стану ГТД в особливих експлуатаційних ситуаціях.

**Ключові слова:** газотурбінний двигун, інтелектуальна система, реконфігурація керування, система діагностування, технічний стан.

## 1. Вступ

Газотурбінний двигун (ГТД) — складна динамічна система (ДС), що складається з безлічі взаємодіючих елементів і підсистем. У міру вдосконалення конструкції й підвищення контролепридатності ГТД скорочується відсоток вузлів і агрегатів, що експлуатуються «за ресурсом», і збільшується число тих, які експлуатуються за прогресивними стратегіями. Ефективність експлуатації ГТД зв'язана, головним чином, з підвищенням їх надійності, збільшенням ресурсу, зниженням витрат на ТО і Р [1–3].

Одним з перспективних напрямів розвитку засобів технічного діагностування є використання у їх складі компонентів штучного інтелекту: продукційних правил, нечіткої логіки, штучних нейронних мереж, гібридних нейро-фаззі архітектур, генетичних алгоритмів. Отже, підвищення економічної ефективності і підтримання високого рівня надійності функціонування газотурбінного приводу на стадії експлуатації в умовах особливих експлуатаційних ситуацій на основі розвитку теоретичних основ, методів і засобів інтелектуального діагностування та керування його режимами є актуальною науково-прикладною проблемою, тому як ГТД знайшли широке застосування в авіації, енергетиці, наземному й морському транспорті, а також у газовій галузі, завдяки цілому ряду їх переваг над іншими типами установок.

## 2. Аналіз літературних даних та постановка проблеми

Гібридні системи для класифікації ТС ГТД застосовують у структурі елементів нечіткої логіки і нейронних мереж. Така система порівнює реальний ТС двигуна за параметрами віброшвидкості та віброприскорення з можливими типовими ТС, які закладні у «базі знань» системи, що дозволить класифікувати поточний ТС двигуна та прогнозувати його подальші зміни. Переваги цих систем діагностики — можливість «навчання», відносно низька вартість налаштування системи на конкретне обладнання (налаштування може проводитись автоматично), можливість постановки діагнозу по не введеним в «базу знань» системи комбінацій діагностичних ознак.

Недолік — необхідність великого обсягу вихідних даних для навчання інтелектуальної діагностичної системи, а також складність контролю за правильністю постановки діагнозу [4, 5].

Систему прогнозу і підтримки рішень для обслуговування по фактичному технічному стану двигуна на базі нейромереж розроблено в Університеті м. Гонконг, КНР [6]. Аналіз опублікованої інформації показав, що ця система інтегрує концепції:

- періодичного моніторингу двигуна;
- інтелектуальної діагностики стану фактичного ТС двигуна.

Діагностична підсистема залучається до аналізу стану двигуна у випадку, коли у процесі моніторингу було виявлено відхилення зареєстрованих показників від заданих норм. Для забезпечення максимальних можливостей прогнозування в системі використано рекурентні нейромережі. За даними авторів, їх прогностичні можливості кращі, ніж у класичних методів (авторегресійні моделі, білінійні моделі, порогові авторегресійні моделі).

## 3. Об'єкт, мета та задачі дослідження

**Об'єкт дослідження** — технічний стан газотурбінного двигуна.

**Мета дослідження** — розробка інтелектуальної автоматичної системи діагностування та реконфігурації керування режимами роботи ГТД.

Для досягнення поставленої мети необхідно виконати такі задачі:

1. Розробити метод навчання інтелектуальної автоматичної системи діагностування та реконфігурації керування режимами роботи ГТД.
2. Дослідити теоретичні та експериментальні показники інтелектуальної класифікації поточного технічного стану ГТД.

## 4. Результати дослідження діагностування стану двигуна

Газотурбінний двигун характеризується множиною станів. Кожний стан визначається конкретним набором

вхідних і вихідних діагностичних параметрів. Зміна вхідного впливу або значень параметрів, що характеризують поведінку окремих елементів двигуна, відповідно до встановлених функціональних залежностей, а також вплив зовнішніх факторів приводять до зміни вихідних параметрів двигуна і його фактичного технічного стану. Наявність складних функціональних залежностей між елементами двигуна, а також значне число різних параметрів, що характеризують кожний з елементів ГТД, ускладнюють формалізацію опису поведінки такої складної технічної системи. На практиці рідко вдається одержати повний математичний опис поведінки ГТД у загальному вигляді, тому частіше намагаються використовувати методи імітації двигуна, що досліджується. Структура діагностування технічного стану (ТС) типового двигуна зображена на рис. 1.

Для діагностування та контролю за двигуном у процесі експлуатації, пропонується розбити його на підсистеми й елементи з ієрархічною структурою зв'язків. Кожна підсистема, вирішуючи конкретне завдання, забезпечує тим самим досягнення загальної мети, тоді ГТД як об'єкт діагностування має такі властивості [1–3]:

- елементи ГТД функціонують у взаємодії один з одним і виконують різноманітні функції;
- властивості ГТД визначаються не тільки властивостями окремих елементів, але й характером їх взаємодії;

- оцінка стану ГТД вимагає одночасно виміру й реєстрації великої кількості функціонально й стохастично взаємозалежних параметрів;
- наявністю регульованих і нерегульованих керуючих впливів і невизначених зовнішніх збурювань стохастичного типу;
- поява несправності або відмови будь-якого елемента двигуна приводить до зниження ефективності функціонування або його відмови;
- поява несправності в будь-якому елементі двигуна підсистеми приводить до створення передумов льотних пригод, якщо як типовий розглядається авіаційний двигун або до виникнення аварійних ситуацій на компресорних станціях (КС), якщо ГТД використовується як силова установка.

Ці властивості характеризують ГТД як складну систему, діагностування та керування, контроль за якою доцільно проводити, використовуючи системний підхід. Тоді ГТД як об'єкт діагностування та керування  $S$  визначимо сукупністю взаємозалежних елементів, що перетворюють простір вхідних сигналів  $X$  у простір вихідних сигналів  $Y$  за допомогою оператора  $F$ :

$$S: X^F \rightarrow Y. \quad (1)$$

Відомо, що в ГТД крім вхідних і вихідних сигналів (змінних) є також керуючі (множина  $W$ ), тобто вхідні змінні, які перебувають під безпосереднім керуванням. Тоді ГТД представимо у такому вигляді:

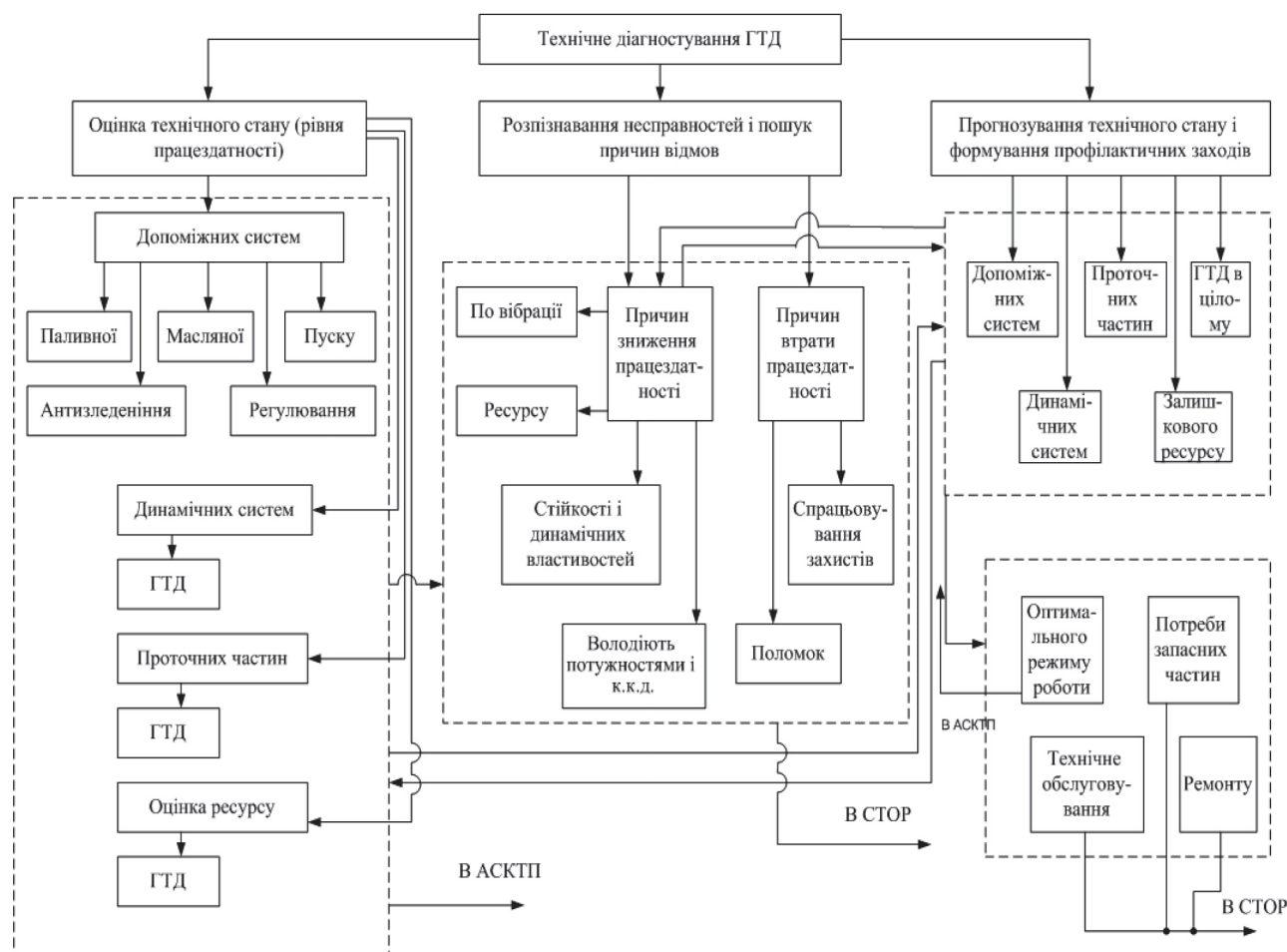


Рис. 1. Структура діагностування ТС типового ГТД

$$XW^F \rightarrow Y, \tag{2}$$

де  $X_1, X_2, \dots, X_n$  – множина станів ГТД, що  $x_i \in X_i$ , для  $\forall_i$ .

Під час впливу на ГТД нерегульованих і невизначених зовнішніх збурень  $\epsilon$ , двигун опишемо у такому вигляді [7]:

$$S: XW\epsilon^F \rightarrow Y, \tag{3}$$

де  $X$  і  $Y$  – вхідні і вихідні множини параметрів двигуна.

Тоді функція  $F$ , яка зв'язує з кожним вхідним параметром двигуна  $x$ , що належить деякій підмножині  $D_s$  множини  $X$ , вихідне значення  $y \in Y_F$ , що відображає  $X$  в  $Y$  ( $X \rightarrow Y$ ).

Підмножина  $G_s \subset X$ , яка складається із точок, що відповідають значенням вхідних параметрів двигуна  $x \in D_s$ , називається областю допустимих значень. Підмножини  $X, Y, W, \epsilon, F$  визначають технічний стан ГТД і можливість досягнення поставленої загальної мети ( $g$ ) на множині  $\{G\}$ , зокрема, виконання завдання, оптимального режиму роботи транспортного двигуна:

$$g: XW\epsilon^F Y \rightarrow \{G\}. \tag{4}$$

Параметри ГТД  $x \in X$  і  $u \in W$  є функціями часу  $t$ , то досягнення поставленої мети представимо таким виразом:

$$g(x, u) = g[x(t), u(t), t]. \tag{5}$$

Тоді, враховуючи формули (3), (4), (5), ГТД як об'єкт діагностування  $S$  представимо у такому вигляді:

$$S_{ijkl} = \{X_i W_i \epsilon_i; Y_j; F_k; g_l\}, \tag{6}$$

де кожна підсистема кінцевого набору підсистем  $S_{ijkl}^1, S_{ijkl}^2, \dots, S_{ijkl}^n, \dots, S_{ijkl}^N$  має такий вигляд:

$$\begin{aligned} S_{ijkl}^1 &= \{XW\epsilon; Y_j^1; F_k^1; g_l^1\}; \\ S_{ijkl}^2 &= \{X^2 W_i^2 \epsilon_i^2; Y_j^2; F_k^2; g_l^2\}; \\ &\dots \\ S_{ijkl}^N &= \{X_i^N W_i^N \epsilon_i^N; Y_j^N; F_k^N; g_l^N\}. \end{aligned} \tag{7}$$

Кожну підсистему, передусім, опишемо як систему, що складається із сукупності взаємозалежних підсистем і границі розподілу між ними визначаються завданнями діагностування та керування.

Представлення ГТД у вигляді окремих підсистем визначається головними цілями

підсистем  $g_{ij}$ , що забезпечують досягнення загальної мети ГТД, і безліччю приватних цілей  $g_{ij}^k$ :

$$g_{ij} \leq U g_{ij}^k. \tag{8}$$

Досягнення мети здійснюється виконанням відповідної множини функцій  $f_{ij}^k$ :

$$F_{ij} \leq U f_{ij}^k. \tag{9}$$

Для виконання поставлених цілей виділяється відповідна кількість ресурсів  $R_{ij} \leq U R_{ij}^k$ . Загальна мета кожної підсистеми  $g_{ij}^k$  полягає у виконанні поставлених завдань  $f_{ij}^k$  при мінімальних витратах і заданих ресурсах  $R_{ij}^k$ , яка реалізується підсистемою  $S_{ijkl}^n$ . Сукупність зовнішніх обмежень, обумовлених режимом функціонування, заданими ресурсами й внутрішніми обмеженнями, пов'язаними з можливостями підсистем більш низького рівня, описувати керованими, керуючими і діагностичними параметрами. Тому основним принципом розділення ГТД на підсистеми, є принцип залежності від мети кожної підсистеми.

У розпізнаванні образів об'єднання множини класифікаторів різної природи використовуємо для розроблення високонадійних систем діагностики й контролю за ТС ГТД. Результати роботи декількох класифікаторів можуть бути об'єднані для поліпшення якості розпізнавання загального ТС ГТД (рис. 2). Запропонована процедура класифікації ТС ГТД реалізуємо за допомогою такого алгоритму, припустимо, що в розглянутій гібридній системі, яка складається з декількох НМ, є  $X_j$  входів і  $Y_n$  класів, тоді процедура класифікації технічного стану ГТД реалізує такий алгоритм [7–10]:

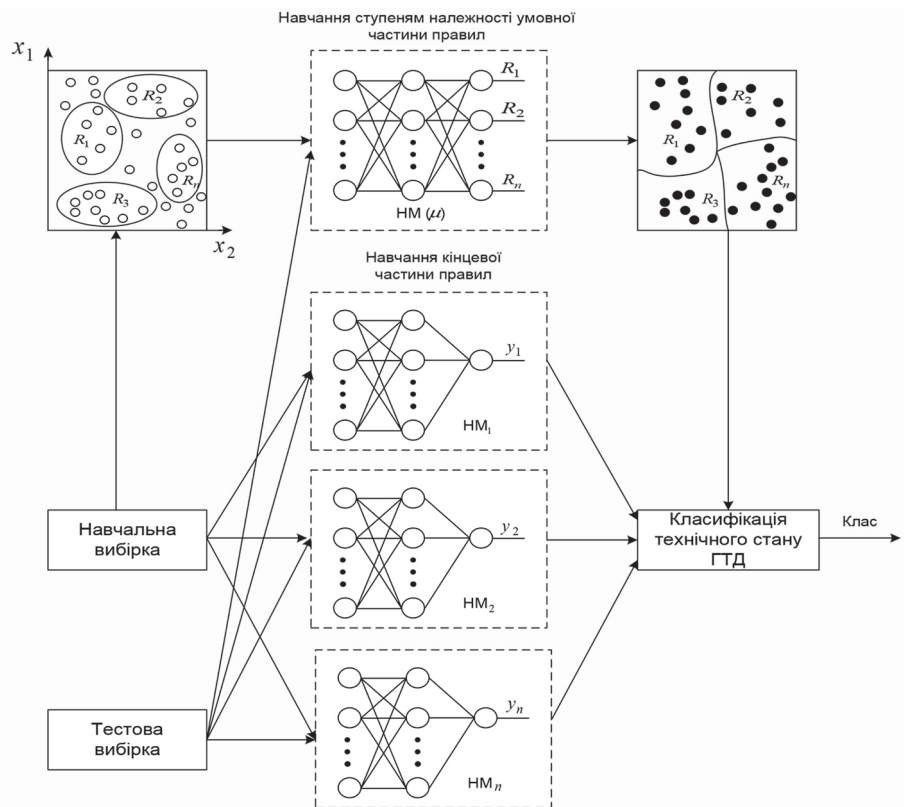


Рис. 2. Структура гібридної ІСАДРК

1. Формування навчальної  $N_0$  й тестової  $N_T$  вибірки;  $N = N_0 + N_T$  — загальне число прикладів, які зберігаються у базі даних запропонованої системи.

2. Кластеризація навчальної вибірки. Ділимо навчальну вибірку на  $K$  класів  $K_s$  (по числу правил), де  $s = 1, 2, \dots, k$ . Кожна навчальна підвибірка для класу  $K_s$  визначається парою  $(x_i^s, y_i^s)$ , де  $i = 1, 2, \dots, N_s$ ,  $X_i$  — вхідний вектор,  $K_i$  — кількість класів, а  $N_s$  — число прикладів у навчальній вибірці для класу  $K_s$ .

3. Навчання НМ ( $\mu$ ). Для кожного вхідного вектора ДО  $X_i \in K_s$  визначимо вектор функцій приналежності до правила  $M_i = (m_i^1, m_i^2, \dots, m_i^r)$  класифікації ТС ГТД, що реалізує алгоритм, у вигляді «якщо (діагностичні ознаки), то (клас ТС ГТД), інакше». Нейронна мережа (радіально-базисна мережа) ( $\mu$ ) з  $n$  входами й  $k$  класами навчається на парах  $(X_i, M_i)$ ,  $i = 1, 2, \dots, N_0$ , тому після навчання й тестування така мережа буде здатна визначити ступінь приналежності  $m_i^s$  для кожного вхідного вектора діагностичні ознаки (ДО) ГТД, що належить класу  $K_s$ . Таким чином, функція належності до частини «якщо...» правила визначається як вихідна величина  $m_i^s$ :

$$m_{A_s}(X_i) = m_i^s, \quad i = 1, 2, \dots, N, \quad s = 1, 2, \dots, r,$$

де  $A_s$  — відповідає нечіткій безлічі умовної частини  $s$ -го правила (ДМ — дуже мала, М — мала, С — середня, В — велика, ДВ — дуже велика).

4. Навчання НМ. Навчальна вибірка із входами  $x_{i1}^s, x_{i2}^s, \dots, x_{in}^s$  вихідними класами ГТД  $K_i$ ,  $i = 1, 2, \dots, j$  подається на вхід і вихід нейронної мережі (НМ), яка є нейромережевою моделлю частини «..., то...» (вібраційний стан ГТД описаний наступними множинами: добре, прийнятно, допустимо, потребує вжиття заходів, недопустимо). За допомогою тестової вибірки обчислюється помилка класифікації ТС ГТД:

$$\epsilon_{\text{кл}} = \sum_{i=1}^{N_T} \{Y_n - m_{A_s}(X_i)\}^2,$$

де  $m_{A_s}(X_i)$  — спостережуваний вхід НМ. Якщо  $\epsilon_{\text{кл}} < \Delta$ , де  $\Delta$  — апіорно задана величина, то НМ — навчена.

На рис. 3 зображено процес розпізнавання вібраційного стану за вібраційними параметрами.

Для навчання одношарового перцептрона мережі Хопфілда і Хеммінга використано алгоритм зворотного поширення помилки, а для радіально-базисної мережі за Й. Рлатту. Як параметри й обмеження навчання задано: середньоквадратичну похибку — 0,05 і максимальну кількість циклів навчання — 400.

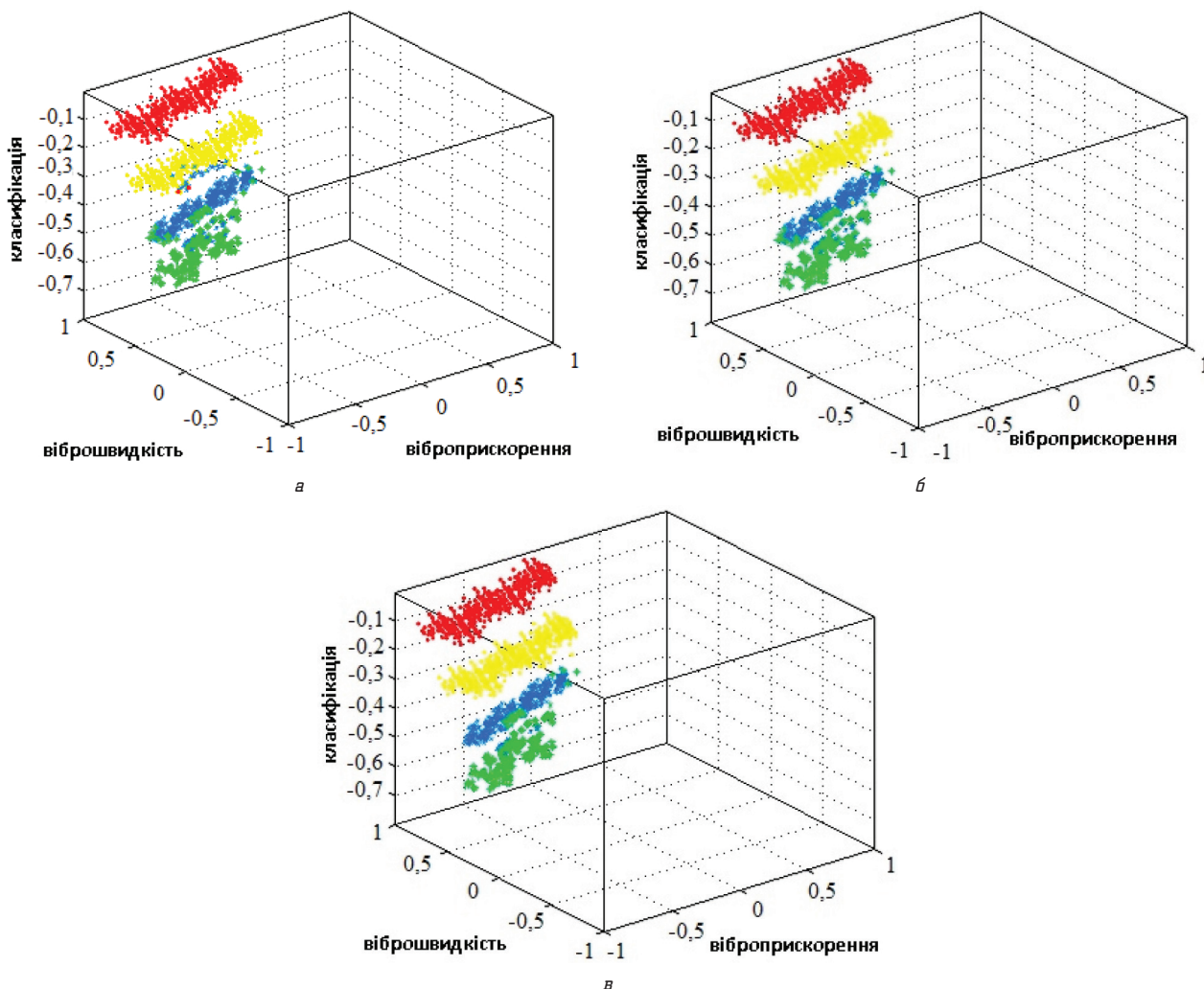


Рис. 3. Процес класифікації вібраційного стану ГТД ДР-59Л: а — одношаровий перцептрон, нейронна мережа Хопфілда; б — нейронна мережа Хеммінга; в — гібридна інтелектуальна система (RBF + нечітка логіка)

Найбільша ефективність запропонованого методу досягнуто за допомогою архітектури нейронної мережі, якщо кількість елементів вхідного вектора дорівнює кількості чинників: кількість шарів – 2, кількість нейронів першого шару  $s_1=12$ , а кількість нейронів другого шару дорівнює кількості можливих вібраційних станів ГТД  $s_2=5$ .

## 5. Обговорення результатів дослідження класифікації ТС ГТД

Результати класифікації ТС ГТД ДР-59Л і ГТД ДТ-71ПЗ наведено у табл. 1 і 2.

Таблиця 1

Результати класифікації ГТД ДР-59Л

№ п/п	Топологія нейронних мереж	Навчальна вибірка		Тестова вибірка	
		Кількість помилок	%	Кількість помилок	%
1	Одношаровий перцептрон	9	2,25	33	8,25
2	Нейронна мережа Хопфілда	9	2,25	30	7,70
3	Нейронна мережа Хеммінга	9	2,25	19	4,75
4	Гібридна інтелектуальна система (RBF+нечітка логіка)	9	2,25	15	3,75

Таблиця 2

Результати класифікації ГТД ДТ-71ПЗ

№ п/п	Топологія нейронних мереж	Навчальна вибірка		Тестова вибірка	
		Кількість помилок	%	Кількість помилок	%
1	Одношаровий перцептрон	11	2,75	33	11,00
2	Нейронна мережа Хопфілда	11	2,75	30	9,25
3	Нейронна мережа Хеммінга	11	2,75	25	6,25
4	Гібридна інтелектуальна система (RBF+нечітка логіка)	11	2,75	18	4,50

Порівняльний аналіз отриманих результатів (табл. 1 і табл. 2) підтверджує те, що розроблена гібридна інтелектуальна система забезпечує мінімальну похибку класифікації вібраційного стану ГТД в процесі експлуатації.

## 6. Висновки

1. Розроблено та синтезовано структуру ІСАДРК ГТД, що ґрунтується на запропонованій моделі, методі. Забезпечує можливість налаштування таких систем для проведення діагностування та реконфігурації керування різнотипних ГТД в процесі їх експлуатації, що сприяє підвищенню достовірності класифікації та прогнозування залишкового ресурсу, а також запобігає переходу аварійної ситуації у катастрофічну.

2. Аналіз отриманих результатів досліджень дозволяє зробити висновок про доцільність використання гібридних ІСАДРК на основі радіально-базисних мереж і теорії нечіткої логіки, що дозволило класифікувати

вібраційний стан ГТД ДР-59Л з імовірністю 0,96 і ГТД ДТ-71ПЗ з імовірністю 0,92.

## Література

- Епифанов, С. В. Идентификация статической и динамической моделей проточной части как средство диагностирования ГТД [Текст] / С. В. Епифанов, И. И. Лобода // Вестник двигателестроения. – 2004. – № 2. – С. 206–212.
- Гасиджак, В. С. Комбинированная стратегия технического обслуживания ГПА по наработке с прогнозированием предотказного состояния [Текст] / В. С. Гасиджак, В. Н. Казак, А. А. Бельская // Матеріали міжнародної конференції «ISDMCT'2008» (Євпаторія, 19–23 травня 2008). – 2008. – Т. 2. – С. 100–103.
- Дмитриев, С. А. Диагностирование проточной части ГТД на установившихся и неустойчивых режимах работы [Текст]: дис. ... докт. техн. наук / С. А. Дмитриев. – К.: КМУГА, 1996. – 358 с.
- Богуслаев, А. В. Методы неитеративного синтеза многослойных нейронных сетей в задачах диагностики авиадвигателей [Текст] / А. В. Богуслаев, В. И. Дубровин, С. А. Субботин // Вестник двигателестроения. – 2004. – № 1. – С. 86–93.
- Богуслаев, А. В. Диагностика лопаток авиадвигателей на основе многослойной логически прозрачной нейронной сети [Текст] / А. В. Богуслаев, В. И. Дубровин, С. А. Субботин, В. К. Яценко // Вестник двигателестроения. – 2002. – № 1. – С. 85–90.
- Yam, R. C. M. Intelligent Predictive Decision Support System for Condition-Based Maintenance [Text] / R. C. M. Yam, P. W. Tse, L. Li, P. Tu // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. – 2001. – Vol. 17, № 5. – P. 383–391. doi:10.1007/s001700170173
- Сиротин, Н. Н. Техническая диагностика авиационных газотурбинных двигателей [Текст] / Н. Н. Сиротин, Ю. М. Коровкин. – М.: Машиностроение, 1979. – 272 с.
- Дубровин, В. И. Интеллектуальные средства диагностирования и прогнозирования надежности авиадвигателей [Текст]: монография / В. И. Дубровин, С. А. Субботин, А. В. Богуслаев, В. К. Яценко. – Запорожье: ОАО «Мотор-Січ», 2003. – 279 с.
- Гасиджак, В. С. Байесовский алгоритм распознавания передвигованных станів газоперекачувальних агрегатів [Текст] / В. С. Гасиджак, В. М. Казак // Вісник центрального наукового центру ТАУ. – К., 2007. – Вип. 10. – С. 77–78.
- Бодянский, Е. В. Искусственные нейронные сети: архитектура, обучение, применение [Текст] / Е. В. Бодянский, О. Г. Руденко. – Харьков: ТЕЛЕТЕХ, 2004. – 372 с.

## ИССЛЕДОВАНИЕ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ КЛАССИФИКАЦИИ ТЕКУЩЕГО ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ГАЗОТУРБИНЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

Приведена структура диагностирования технического состояния газотурбинного двигателя (ГТД). Предложен метод обучения интеллектуальной автоматической системы диагностирования и реконфигурации управления (ИСАДРК) режимами работы ГТД на базе интеграции нечеткой логики и нейронных сетей. Исследовано теоретически и экспериментально возможности классификации ИСАДРК текущего технического состояния ГТД в особых эксплуатационных ситуациях.

**Ключевые слова:** газотурбинный двигатель, интеллектуальная система, реконфигурация управления, система диагностирования, техническое состояние.

*Кравчук Микола Петрович, кандидат технических наук, ассистент, кафедра автоматизации та енергоменеджменту, Національний авіаційний університет, Київ, Україна, e-mail: KravchukNP@ukr.net.*

*Кравчук Николай Петрович, кандидат технических наук, ассистент, кафедра автоматизации и энергоменеджмента, Национальный авиационный университет, Киев, Украина.*

*Kravchuk Nikolay, National Aviation University, Kyiv, Ukraine, e-mail: KravchukNP@ukr.net*