

УДК 004.89

DOI: 10.31471/1993-9981-2019-2(43)-68-77

## МЕТОД ОЦІНКИ ТЕХНІЧНОГО СТАНУ КАМЕРИ ЗГОРЯННЯ ГАЗОТУРБІННОЇ УСТАНОВКИ НА ЗАСАДАХ ШТУЧНОГО ІНТЕЛЕКТУ

*М. І. Горбійчук, О. Т. Біла, Н. Т. Лазорів, А. М. Лазорів*

*Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу,  
вул. Карпатська, 15, м.Івано-Франківськ, 76019, e-mail: ksm@nung.edu.ua*

Надійна і ефективна робота газоперекачувального агрегату в значній степені залежить від технічного стану камери згоряння. Незадовільний технічний стан камери згоряння знижує не тільки коефіцієнт корисної дії газоперекачувального агрегату, але й збільшує шкідливі викиди в навколишнє середовище шкідливих речовин таких як оксиди азоту і вуглецю. Тому визначення технічного стану камери згоряння за результатами спостережень за роботою газотурбінної установки є актуальною науковою задачею.

У результаті аналізу літературних джерел і експериментальних досліджень встановлено, що опосередкованими показниками, які характеризують технічний стан камери згоряння, є сумарна концентрація оксидів азоту і середньоквадратичне значення віброшвидкості корпусу камери згоряння. З плином часу відбувається деградація елементів камери згоряння, що приводить до зміни ознак технічного стану камери згоряння. Показники технічного стану утворюють площину ознак, яку за допомогою нейромережі Кохонена, розбито на три області, кожна із яких відповідає певному технічному стану камери згоряння - «добре», «прийнятно», «допустимо». Для розмежування областей технічних станів розроблений метод побудови роздільних кривих на засадах генетичних алгоритмів. Рівняння роздільних кривих взято як поліном певної степені. Розроблений метод на основі критерію розділення класів визначає не тільки параметри рівняння роздільної кривої, але й структуру такого рівняння шляхом мінімізації критерію розділення класів. За допомогою розробленого програмного забезпечення задачі оцінки технічного стану камери згоряння площина ознак розбита на три класи і побудовані роздільні криві, які їх розмежовують.

*Ключові слова.* Газотурбінна установка, камера згоряння, технічний стан, нейромережа, критерій розділення, роздільна крива, генетичний алгоритм.

Надежная и эффективная работа газоперекачивающего агрегата в значительной степени зависит от технического состояния камеры сгорания. Неудовлетворительное техническое состояние камеры сгорания снижает не только коэффициент полезного действия газоперекачивающего агрегата, но и увеличивает вредные выбросы в окружающую среду вредных веществ таких как оксиды азота и углерода. Поэтому определение технического состояния камеры сгорания по результатам наблюдений за работой газотурбинной установки является актуальной научной задачей.

В результате анализа литературных источников и экспериментальных исследований установлено, что опосредованными показателями, характеризующим техническое состояние камеры сгорания, является суммарная концентрация оксидов азота и среднее значение виброскорости корпуса камеры сгорания. С течением времени происходит деградация элементов камеры сгорания, приводит к изменению признаков технического состояния камеры сгорания. Показатели технического состояния образуют плоскость признаков, которую с помощью нейросети Кохонена, разбиты на три области, каждая из которых соответствует определенному техническому состоянию камеры сгорания - «хорошо», «приемлемо», «допустим». Для разграничения областей технических состояний разработан метод построения отдельных кривых на основе генетических алгоритмов. Уравнение отдельных кривых взято как полином определенной степени. Разработанный метод на основе критерия разделения классов определяет не только параметры уравнения разрешения кривой, но и структуру такого уравнения путем минимизации критерия разделения классов. С помощью разработанного программного обеспечения задачи оценки технического состояния камеры сгорания плоскость признаков разбита на три класса и построены отдельные кривые, их разграничивают.

*Ключевые слова.* Газотурбинная установка, камера сгорания, техническое состояние, нейросеть, критерий разделения, разрешение кривая, генетический алгоритм.

Reliable and efficient operation of the gas-pumping unit to a large extent depends on the technical state of the combustion chamber. The poor technical state of the combustion chamber reduces not only the efficiency of the gas

pumping unit, but also increases the harmful emissions to the environment of harmful substances such as nitrogen and carbon oxides. Therefore, the determination of the technical state of the combustion chamber by the results of observations on the operation of the gas turbine installation is an actual scientific task.

As a result of the analysis of literary sources and experimental studies, it is established that the mediated parameters characterizing the technical state of the combustion chamber are the total concentration of nitrogen oxides and the mean square value of the vibration velocity of the combustion chamber body. Over time, the elements of the combustion chamber are degrading, which leads to a change in the signs of the technical state of the combustion chamber. Indicators of a technical state form a plane of signs, which, with the help of the neural network Kohonen, are divided into three areas, each of which corresponds to a certain technical state of the combustion chamber - "good", "acceptable", "permissible". A method for constructing separate curves based on genetic algorithms is developed to distinguish the areas of technical states. The equation of separate curves is taken as a polynomial of a certain degree. The developed method on the basis of the class separation criterion determines not only the parameters of the equation of a separate curve but also the structure of such an equation by minimizing the class separation criterion. With the help of the developed software of the task of the technical condition assessment of the combustion chamber, the plane of the signs is divided into three classes and separate split curves are constructed.

*Keywords.* Gas turbine installation, combustion chamber, technical condition, neural network, separation criterion, separation curve, genetic algorithm.

## Вступ

Основним елементом газотранспортної системи є компресорні станції, які забезпечують транспортування газу магістральними трубопроводами. Процес переміщення природного газу здійснюється за допомогою газоперекачувальних агрегатів, які у своєму складі мають газотурбінну установку (ГТУ) і відцентровий нагнітач (ВЦН).

Камера згоряння є одним із основних вузлів газотурбінної установки (ГТУ), яка служить приводом ВЦН природного газу.

Надійна робота камери згоряння в знаній степені визначає довговічність ГТУ у цілому, а так же степінь її впливу на навколишнє середовище.

Технічний стан камери згоряння наряду з проточною частиною ВЦН у значній мірі зумовлює термін експлуатації газоперекачувального агрегату (ГПА).

Метод автоматичного розпізнавання технічного стану камери згоряння ГТУ дасть змогу в процесі функціонування ГПА забезпечити такий режим управління, що буде оптимальним у даних умовах.

## Аналіз літературних джерел

Питанню визначення технічного стану камери згоряння присвячено цілий ряд робіт. Так у роботі [1] досліджується зв'язок між середньоквадратичним значеннями (СКЗ) віброшвидкості камери згоряння і вібраційним горінням, яке є небажаним. Наявність

вібраційного горіння може призвести до руйнування елементів камери згоряння.

Наявність дефектів у камері згоряння приводить до кількісних змін характеристик газового потоку на виході компресорної станції [2, 3]. Зміна технічного стану камери згоряння приводить не лише до погіршення техніко-економічних показників роботи ГПА, але й збільшення граничнодопустимих концентрацій шкідливих речовин у викидах у викидах ГПА у тому числі оксидів азоту і вуглецю [4]. Наприклад, викиди оксидів азоту і вуглецю за рік компресорною станцією Богородчанського ЛВУМГ складають 8,8 % від усіх шкідливих речовин [5].

Таким чином, актуальною задачею є визначення технічного стану камери згоряння в процесі експлуатації газоперекачувального агрегату.

## Оцінка технічного стану камери згоряння за допомогою нейронних технологій

Достовірно оцінити технічний стан камери згоряння можна за допомогою певних критеріїв (діагностичних ознак), які змінюють своє значення при наявності пошкоджень, дефектів та несправностей в вузлах камери згоряння.

Серед діагностичних ознак оцінки технічного стану камери згоряння особливої уваги заслуговують параметричні ознаки [6]. До таких ознак слід віднести сумарну концентрацію викидів оксидів азоту і вуглецю та середньоквадратичне значення (СКЗ) віброшвидкості корпусу камери згоряння.

У теперішній час для оцінювання технічного стану окремих вузлів ГПА знаходять своє застосування штучні нейронні мережі [7], за допомогою яких виявляють несправність лопаток газових турбін [8], діагностують продуктивність газової турбіни [9].

З плином часу діагностичні ознаки змінюють своє значення внаслідок деградації елементів в камері згоряння.

Утворимо простір станів діагностичних ознак. Тоді множину значень діагностичних ознак камери згоряння у такому просторі можна розбити на  $s_j$  класів, наприклад, «добре», «прийнятно», «допустимо» [10]. Сукупність класів розбиття простору технічних станів камери згоряння позначимо через  $\Omega_1, \Omega_2, \dots, \Omega_s$ , які в теорії розпізнавання образів називають об'єктами. Для правильної класифікації об'єктів необхідно мати деякі образи (об'єкти) або прецеденти, правильна класифікація яких відома.

Отже, суть задачі розпізнавання образів у тому, щоб за допомогою деякої індикаторної функції  $g(\bar{\omega})$  [11], яка невідома спостерігачу, простір образів розбити на  $s$  класів, що не перетинаються між собою -  $\Omega_1 \cup \Omega_2 \cup \dots \cup \Omega_s = \emptyset$ , де  $\emptyset$  - пуста множина.

Камера згоряння характеризується своїми діагностичними ознаками, які можна виміряти і які утворюють простір спостережень  $X$ . Це означає, що існує така функція  $g(\bar{\omega})$ , яка ставить у відповідність кожному об'єктові  $\bar{\omega}$  точку  $\bar{x}(\bar{\omega})$  у просторі  $X$ . За результатами спостережень за діагностичними ознаками камери згоряння  $x_j$  можна побудувати оцінку  $\hat{g}(x) = \hat{g}(x(\bar{\omega}))$  функції  $g(x)$ , яка носить назву правила розбиття. Задачею розпізнавання образів є побудова такого правила розбиття, яке б здійснювало операцію розпізнавання образів з мінімальною кількістю помилок.

У залежності від прецедентної інформації, яка є у розпорядженні спостерігача, розпізнавання образів можна здійснювати одним із двох методів – навчання з учителем і навчання без учителя.

При навчанні з учителем повинна бути відома множина векторів ознак, яка сформована для певного набору образів, а також відома правильна класифікація таких образів у вигляді класів. Тоді за спостереженнями ознак необхідно віднести об'єкт до певного класу.

Навчання без учителя використовують у тому випадку, коли правильна класифікація образів невідома. Тоді виникає задача кластеризації [11], суть якої в розділенні образів на класи за подібністю відповідних векторів ознак.

Якщо ознаки об'єктів (образів) мають стохастичну природу спостережень, то віднесення образів до певного класу доцільно здійснювати за допомогою байєсовського методу або методу мінімального ризику [12].

Кластеризація за допомогою нечітких множин дає змогу кожному елементу множини поставити у відповідність степінь його належності до певного класу. Розбиття об'єктів множини  $X$  на класи потребує синтезу баз знань, за допомогою якої формують нечіткі правила віднесення конкретного об'єкта до того чи іншого класу [13].

Мережеві алгоритми кластеризації будують, використовуючи метод динамічних ядер. Суть методу в тому, що за отриманою вибіркою даних  $\{x_j\}$  формується простір векторів  $R$ . З кожним класом асоційований його типовий об'єкт – ядро класу. Необхідно визначити набір із  $m$  ядер і здійснити розбиття векторів ознак  $\{\bar{x}^p\}$  на класи.

Для віднесення об'єкта  $\bar{x}^p$  до певного класу необхідно визначити міру близькості  $\omega_d(\bar{x}, a)$  між  $\bar{x}^p$  і  $a^i$ . Розв'язання сформованої задачі ґрунтується на мінімізації суми віддалей  $D_i$  від відповідних точок вибірки до ядра класу

$$q = \sum_i D_i, \quad (1)$$

де  $D_i = \sum \omega_d(\bar{x}, a^i)$ .

Мінімум суми (1) визначається за всіма можливими положеннями ядер і всіма класами.

Нейронну мережу, яка реалізує метод динамічних ядер, називають мережею Кохонена. Алгоритм, який реалізований в мережі Кохонена, підлаштовує ваги нейронів за їх значеннями на попередній ітерації [14]

$$w_{ij}(t) = w_{ij}(t-1) + \alpha(x_j - w_{ij}(t-1)), \quad (2)$$

де  $\alpha$  - коефіцієнт налаштування ваг нейрона;  $t$  - номер ітерації.

Навчання мережі Кохонена здійснюється за алгоритмом, суть якого у тому, що із всього шару мережі вибирається нейрон, значення синапсів (ваг)  $w_{ij}(t)$  якого максимально подібні до вхідного образу (вектора даних), і налаштування

ваг за формулою (2) здійснюється здійснюється тільки для нього.

На рис. 1 показана множина векторів  $\{\bar{x}^p\}$  діагностичних ознак камери згоряння. Експериментальні дані отримані в результаті спостереження за роботою ГПА типу ГТ-750-6 станції № 7 КС «Лубенська» УМГ «Київтрансгаз», які проводились з 10.05.2018 року по 24.09.2018 року. Компонентами вектора  $\bar{x}$  є сумарна концентрація оксидів азоту  $NO$  і вуглецю  $CO$  та СКЗ віброшвидкості корпусу камери згоряння, які приведені до безрозмірних одиниць за такими формулами:

$$x_i = \frac{X_i - X_{i,max}}{X_{i,min} - X_{i,max}}, i = 1, 2, \quad (3)$$

де  $X_1$  - сумарна концентрація оксидів азоту  $NO$  і вуглецю  $CO$ ,  $мг / кг$ ;  $X_2$  - СКЗ віброшвидкість корпусу камери згоряння,  $мм/с$ .

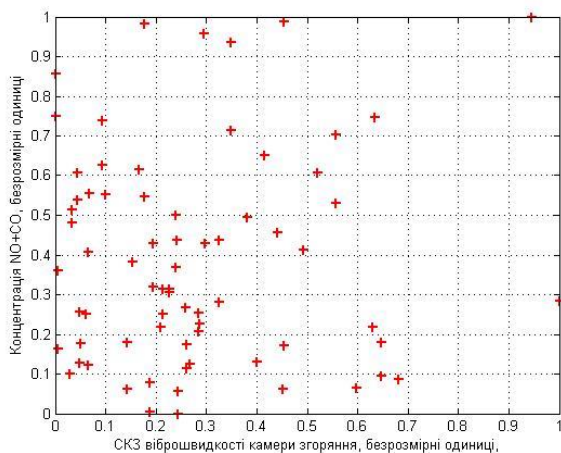


Рисунок 1 – Множина значень діагностичних ознак камери згоряння.

Розбиття множин ознак образів, які задані у вигляді координат точок на площині  $x_1x_2$  (рис. 1) ( $x_1$  - СКЗ віброшвидкості корпусу камери згоряння;  $x_2$  - сумарна концентрація оксидів азоту і вуглецю), здійснювалось за допомогою мережі Кохонена з такими параметрами: число нейронів в мережі – 3; коефіцієнт навчання мережі – 0,01; коефіцієнт «справедливості» - 0,001.

Результат розбиття множини образів на кластери ілюструє рис. 2.

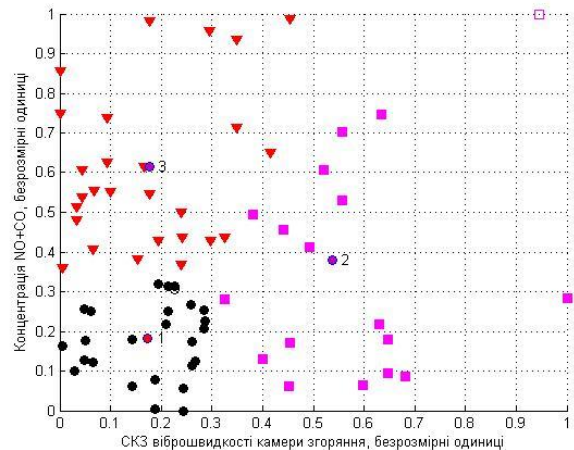


Рисунок 2 – Розбиття множини образів на кластери.

Аналіз отриманих результатів показує, що відбулося розбиття множини образів на три класи. Кожний клас характеризується своїм центром. На рис. 2 центри класів позначені цифрами – «1», «2» і «3».

### Синтез функцій класифікації технічних станів камери згоряння

У просторі ознак (рис.2) кожний технологічний параметр, який характеризує технічний стан певного камери згоряння, віднесений до певного класу. Необхідно побудувати роздільну лінію між першим і другим класами; потім між першим і третім класами (рис.2).

Розглянемо загальний випадок, коли розбиття площини ознак технічних станів камери згоряння здійснено на  $z$  класів. Задача полягає у тому, щоб побудувати роздільну криву між  $z_{i-1}$  і  $z_i$  класами.

Нехай клас  $z_{i-1}$  вміщує  $N_o$ , а  $z_i$  -  $N_w$  ознак технічного стану. Функцію, яка описує лінію, що розділяє класи  $z_{i-1}$  і  $z_i$ , позначимо через  $f(\bar{a}, \bar{x})$ , де  $\bar{a}$  - вектор параметрів роздільної кривої;  $\bar{x}$  - вектор параметрів контролю розмірності  $n$ . При заданій функції  $f(\bar{a}, \bar{x})$  її параметри можна визначити [15], мінімізуючи функцію

$$F(\bar{a}) = \frac{1}{N_o} \sum_{i=1}^{N_o} (f(\bar{x}^{oi}, \bar{a}) - 1)^2 + \frac{1}{N_w} \sum_{j=1}^{N_w} (f(\bar{x}^{wj}, \bar{a}) + 1)^2, \quad (4)$$

де  $f(\bar{x}^{oi}, \bar{a}) \approx 1$ , якщо  $\bar{x}^{oi}$  належить  $z_{i-1}$  класу,  $f(\bar{x}^{wi}, \bar{a}) \approx -1$ , якщо  $\bar{x}^{wi}$  віднесена до  $z_i$  класу.

Параметри  $\bar{a}$  необхідно підібрати таким чином, щоб функцію  $f(\bar{x}^{oi}, \bar{a})$  наблизити до

«одиниці», а функцію  $f(\bar{x}^{oi}, \bar{a})$  до «мінус одиниці». При такому виборі параметрів  $\bar{a}$  функція  $F(\bar{a})$  набуде мінімального значення.

Допустимо, що функція  $f(\bar{a}, \bar{x})$  є лінійною відносно своїх параметрів  $\bar{a} = (a_0, a_1, \dots, a_{m-1})^T$ . Отже,

$$f(\bar{a}, \bar{x}) = \sum_{p=0}^{m-1} a_p \varphi_p(\bar{x}), \quad (5)$$

де  $\varphi_p(\bar{x})$  - відомі функції.

Функцію (5) подамо у вигляді скалярного добутку  $f(\bar{a}, \bar{x}) = \bar{a}^T \bar{\varphi}(\bar{x})$ . Тоді критерій наближення (4) набуде такого вигляду:

$$F(\bar{a}) = \frac{1}{N_o} \sum_{i=1}^{N_o} (\bar{a}^T \bar{\varphi}(\bar{x}^{oi}) - 1)^2 + \frac{1}{N_w} \sum_{j=1}^{N_w} (\bar{a}^T \bar{\varphi}(\bar{x}^{wj}) + 1)^2. \quad (6)$$

Знайдемо мінімум функції (6) відносно вектор-параметра  $\bar{a}$ , продиференціюємо праву частину співвідношення (6) і прирівняємо отриманий результат до нуля. Тоді

$$\begin{aligned} & \frac{1}{N_o} \sum_{i=1}^{N_o} (\bar{a}^T \bar{\varphi}(\bar{x}^{oi}) - 1) \bar{\varphi}(\bar{x}^{oi}) \\ & + \frac{1}{N_w} \sum_{j=1}^{N_w} (\bar{a}^T \bar{\varphi}(\bar{x}^{wj}) + 1) \bar{\varphi}(\bar{x}^{wj}) = 0 \end{aligned} \quad (7)$$

Якщо ввести позначення

$$\bar{b} = \frac{1}{N_o} \sum_{i=1}^{N_o} \bar{\varphi}(\bar{x}^{oi}) - \frac{1}{N_w} \sum_{j=1}^{N_w} \bar{\varphi}(\bar{x}^{wj}), \quad (8)$$

то рівняння (8) набуде такого вигляду:

$$\begin{aligned} & \frac{1}{N_o} \sum_{i=1}^{N_o} \bar{a}^T \bar{\varphi}(\bar{x}^{oi}) \bar{\varphi}(\bar{x}^{oi}) + \\ & \frac{1}{N_w} \sum_{j=1}^{N_w} \bar{a}^T \bar{\varphi}(\bar{x}^{wj}) \bar{\varphi}(\bar{x}^{wj}) = \bar{b} \end{aligned} \quad (9)$$

Вираз  $\bar{a}^T \bar{\varphi}(\bar{x}^{oi}) \bar{\varphi}(\bar{x}^{oi})$  подамо у розгорнутому вигляді:

$$\bar{a}^T \bar{\varphi}(\bar{x}^{oi}) \bar{\varphi}(\bar{x}^{oi}) = \begin{pmatrix} a_0 \varphi_0(\bar{x}^{oi}) + \\ a_1 \varphi_1(\bar{x}^{oi}) + \dots \\ + a_{m-1} \varphi_{m-1}(\bar{x}^{oi}) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \varphi_0(\bar{x}^{oi}) \\ \varphi_1(\bar{x}^{oi}) \\ \dots \\ \varphi_{m-1}(\bar{x}^{oi}) \end{pmatrix}.$$

Виконавши множення скалярної величини на стовпцеву матрицю, отримаємо

$$\bar{a}^T \bar{\varphi}(\bar{x}^{oi}) \bar{\varphi}(\bar{x}^{oi}) = \begin{pmatrix} a_0 \varphi_0^2(\bar{x}^{oi}) + a_1 \varphi_0(\bar{x}^{oi}) \varphi_1(\bar{x}^{oi}) + \dots + a_{m-1} \varphi_0(\bar{x}^{oi}) \varphi_{m-1}(\bar{x}^{oi}) \\ a_0 \varphi_1(\bar{x}^{oi}) \varphi_0(\bar{x}^{oi}) + a_1 \varphi_1^2(\bar{x}^{oi}) + \dots + a_{m-1} \varphi_1(\bar{x}^{oi}) \varphi_{m-1}(\bar{x}^{oi}) \\ \dots \\ a_0 \varphi_{m-1}(\bar{x}^{oi}) \varphi_0(\bar{x}^{oi}) + a_1 \varphi_{m-1}(\bar{x}^{oi}) \varphi_1(\bar{x}^{oi}) + \dots + a_{m-1} \varphi_{m-1}^2(\bar{x}^{oi}) \end{pmatrix}. \quad (10)$$

Введемо такі позначення:  $\alpha_{kl}(\bar{x}^{oi}) = \varphi_k(\bar{x}^{oi}) \varphi_l(\bar{x}^{oi})$ . Тоді рівність (10) буде такою:

$$\bar{a}^T \bar{\varphi}(\bar{x}^{oi}) \bar{\varphi}(\bar{x}^{oi}) = \begin{pmatrix} \alpha_{00}(\bar{x}^{oi}) a_0 + \alpha_{01}(\bar{x}^{oi}) a_1 + \dots + \alpha_{0,m-1}(\bar{x}^{oi}) a_{m-1} \\ \alpha_{10}(\bar{x}^{oi}) a_0 + \alpha_{11}(\bar{x}^{oi}) a_1 + \dots + \alpha_{1,m-1}(\bar{x}^{oi}) a_{m-1} \\ \dots \\ \alpha_{m-1,0}(\bar{x}^{oi}) a_0 + \alpha_{m-1,1}(\bar{x}^{oi}) a_1 + \dots + \alpha_{m-1,m-1}(\bar{x}^{oi}) a_{m-1} \end{pmatrix}.$$

Із останнього виразу випливає, що

$$\bar{a}^T \bar{\varphi}(\bar{x}^{oi}) \bar{\varphi}(\bar{x}^{oi}) = A(\bar{x}^{oi}) \bar{a}, \quad (11)$$

де

$$A(\bar{x}^{oi}) = \begin{pmatrix} \alpha_{00}(\bar{x}^{oi}) & \alpha_{01}(\bar{x}^{oi}) & \dots & \alpha_{0,m-1}(\bar{x}^{oi}) \\ \alpha_{10}(\bar{x}^{oi}) & \alpha_{11}(\bar{x}^{oi}) & \dots & \alpha_{1,m-1}(\bar{x}^{oi}) \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \alpha_{m-1,0}(\bar{x}^{oi}) & \alpha_{m-1,1}(\bar{x}^{oi}) & \dots & \alpha_{m-1,m-1}(\bar{x}^{oi}) \end{pmatrix} -$$

матриця розміром  $m \times m$ .

Аналогічним чином запишемо вираз  $\bar{a}^T \bar{\varphi}(\bar{x}^{wj}) \bar{\varphi}(\bar{x}^{wj})$  в матрично-векторній формі

$$\bar{a}^T \bar{\varphi}(\bar{x}^{wj}) \bar{\varphi}(\bar{x}^{wj}) = A(\bar{x}^{wj}) \bar{a}, \quad (12)$$

де

$$A(\bar{x}^{wj}) = \begin{pmatrix} \alpha_{00}(\bar{x}^{wj}) & \alpha_{01}(\bar{x}^{wj}) & \dots & \alpha_{0,m-1}(\bar{x}^{wj}) \\ \alpha_{10}(\bar{x}^{wj}) & \alpha_{11}(\bar{x}^{wj}) & \dots & \alpha_{1,m-1}(\bar{x}^{wj}) \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \alpha_{m-1,0}(\bar{x}^{wj}) & \alpha_{m-1,1}(\bar{x}^{wj}) & \dots & \alpha_{m-1,m-1}(\bar{x}^{wj}) \end{pmatrix}$$

З врахуванням значень (7) і (8), рівняння (5) стане таким:

$$\left( \frac{1}{N_o} \sum_{i=1}^{N_o} A(\bar{x}^{oi}) + \frac{1}{N_w} \sum_{j=1}^{N_w} A(\bar{x}^{wj}) \right) \bar{a} = \bar{b}, \text{ або } A \bar{a} = \bar{b}, \quad (13)$$

де

$$A = \frac{1}{N_o} \sum_{i=1}^{N_o} A(\bar{x}^{oi}) + \frac{1}{N_w} \sum_{j=1}^{N_w} A(\bar{x}^{wj}). \quad (14)$$

Функції  $\varphi_p(\bar{x})$  виберемо у вигляді степеневого одночлена

$$\varphi_p(\bar{x}) = \prod_{v=1}^{m_p} x_v^{s_{vp}}, \quad (15)$$

де  $s_{vp}$  - степені аргументів, які повинні

задовольняти обмеженню  $\sum_{v=1}^{m_p} s_{vp} \leq r$ . Тоді рівняння роздільної лінії (6) буде поліномом степені  $r$

$$f(\bar{a}, \bar{x}) = \sum_{p=0}^{m-1} a_p \prod_{v=1}^{m_p} x_v^{s_{vp}}. \quad (16)$$

Кількість членів полінома (16) визначають за такою формулою [16]:

$$m = \frac{(m_i + r)!}{m_i! r!}. \quad (17)$$

При виборі функції  $\varphi_p(\bar{x})$  у вигляді (15), елементи матриць  $A(\bar{x}^{oi})$  і  $A(\bar{x}^{wj})$  слід обчислювати за такими формулами:

$$\alpha_{kl}(\bar{x}^{oi}) = \prod_{v=1}^{m_p} x_v^{(oi)(s_{vk} + s_{vl})};$$

$$\alpha_{kl}(\bar{x}^{wj}) = \prod_{v=1}^{m_p} x_v^{(wj)(s_{vk} + s_{vl})},$$

$$k, l = \overline{0, m-1}, \quad (18)$$

а компоненти вектора  $\bar{b}$  набудуть такого вигляду:

$$b_k = \frac{1}{N_o} \sum_{i=1}^{N_o} \prod_{v=1}^{m_p} x_v^{(oi)s_{vk}} - \frac{1}{N_w} \sum_{j=1}^{N_w} \prod_{v=1}^{m_p} x_v^{(wj)s_{vk}},$$

$$k = \overline{0, m-1}. \quad (19)$$

Після того як вибрана структура полінома (15), визначення рівняння роздільної кривої  $f(\bar{a}, \bar{x}) = 0$  зводиться до розв'язання матричного рівняння (13), наприклад, методом зворотного ходу Гауса [17].

Для синтезу роздільної кривої між  $z_{i-1}$  і  $z_i$  класами будемо використовувати поліном (5) другого і вище порядків. При цьому допускається, що порядок полінома (15) уже вибраний, і задачею побудови класифікатора на основі роздільних функцій є визначення її параметрів, які знаходять, як розв'язок матричного рівняння (13).

Синтез полінома оптимальної складності здійснимо з використанням генетичного алгоритму. Для цього утворимо упорядковану структуру довжиною  $m$ , де  $m$  обчислюється за формулою (17), в якій на  $p$ -тому місці буде знаходитись одиниця або нуль у залежності від того чи коефіцієнт  $a_p$  включений до моделі (16) або його значення дорівнює нулю. Таку упорядковану послідовність в теорії генетичних алгоритмів називають хромосомою, а її елемент геном. Певна сукупність хромосом утворює популяцію. Важливим поняттям в теорії генетичних алгоритмів є функція пристосування (фітнес-функція), яка визначає ступінь пристосування особин у популяції і яка дає змогу із популяції особин вибрати особину з

найменшим (найбільшим) значенням функції пристосування. У задачі синтезу оптимальної структури роздільної кривої значення функції пристосування обчислюється за формулою (4).

Таким чином, задачу синтезу роздільної функції сформуємо наступним чином: із початкової популяції хромосом шляхом еволюційного відбору вибрати таку хромосому, яка забезпечує найменше значення функції пристосування (4).

Алгоритм синтезу рівняння роздільної кривої складається із кортежу операторів, які виконуються у такій послідовності:

$$\langle In, Es, Ch, Se, Fo \rangle,$$

*Оператор In* - Ініціалізація. Випадковим чином формується популяція  $I$  із  $q$  хромосом, кожна із яких має довжину  $m$  і вміщує  $m_u$  «одиниць» і  $m - m_u$  «нулів». Довжина кожної хромосоми визначається за формулою (17).

*Оператор Es* - Оцінка пристосованості хромосоми у популяції. Для кожної хромосоми із популяції  $I$  формується поліном степні  $r$ , у якому вилучаються коефіцієнти  $a_p$ , що асоційовані з  $m - m_u$  нулями хромосоми. Для  $m_u$  коефіцієнтів обчислюються елементи матриць  $A(\bar{x}^{oi})$  і  $A(\bar{x}^{wj})$  компоненти вектора  $\bar{b}$  за формулами (18) і (19). Матрицю  $A$  обчислюємо за формулою (14). У результаті розв'язування матричного рівняння (13) отримуємо коефіцієнти полінома (16), які асоційовані з одиницями  $m_u$  чергової хромосоми із популяції  $I$ . Для кожної хромосоми із популяції  $I$  аналогічним чином обчислюємо коефіцієнти  $a_p$  і відповідно обчислюють функцію пристосованості за формулою (4).

*Оператор Ch* - Перевірка умови зупинки алгоритму. Із популяції  $I$  вибирається та хромосома, для якої виконується умова:

$$F_{min} = \min_{\bar{a}_p} F_h(\bar{a}_p), \quad h = \overline{1, q}. \quad (20)$$

Якщо мінімальне значення функції пристосованості  $F_{min}$  (критерію селекції), яке визначено за умовою (20), не перевищує деякого додатного значення  $\varepsilon$ , що визначає точність розв'язання задачі синтезу рівняння роздільної лінії оптимальної складності, то відбувається зупинка процесу обчислень. Процес обчислень може також закінчитись у випадках, коли на

черговій ітерації не відбувається зменшення критерію селекції або алгоритмом досягнуто задане граничне значення число ітерацій. Після виконання однієї із трьох умов зупинки процесу обчислень вибирається хромосома  $ch^*$  із популяції  $I$ , для якої виконується умова (20). Хромосома  $ch^*$  і задає структуру рівняння роздільної лінії оптимальної складності.

*Оператор Se* - Селекція хромосом. На теперішній час для селекції хромосом найчастіше використовують метод рулетки і турнірний метод. Нами використаний турнірний метод, який на відміну від методу рулетки, може застосовуватись для розв'язання як задач мінімізації, так і задач максимізації функцій [18]. Турнірна селекція передбачає, що всі хромосоми розбиваються на підгрупи з наступним вибором найкращої хромосоми із кожної утвореної підгрупи. Кожна підгрупа може вміщувати довільне число хромосом, але найчастіше популяцію ділять на підгрупи по 2 – 3 хромосоми у кожній із підгруп.

*Оператор Fo* - Формування нової популяції потомків. Нова популяція потомків формується за допомогою двох операторів – схрещування і мутації [18]. Вірогідність схрещування вибирається із інтервалу  $P_c \in [0,5;1]$ , а вірогідність мутації лежить в інтервалі  $P_m \in [0;0,1]$ .

Процес схрещування складається із двох етапів. На першому етапі за допомогою оператора *Se* формуються підгрупи із  $\gamma$  особин (хромосом) у кожній підгрупі. Із кожної підгрупи за критерієм селекції  $F(ch^*) = \min_i F(ch_i)$ ,  $i = 1, \gamma$  відбирається найкраща хромосома. До отриманих хромосом, які утворюють нову популяцію (пул родичів), застосовують операцію схрещування. Для цього із пулу родичів випадковим чином вибирається пара хромосом, для якої генерується ймовірність  $P_c$ . У тому випадку, коли  $P_c \leq P_c^{(g)}$ , де  $P_c^{(g)}$  - ймовірність, що вибирається з інтервалу  $[0,5;1]$ , над парою хромосом здійснюється схрещування. У протилежному випадку пара хромосом залишається без змін. При виконанні умови  $P_c \leq P_c^{(g)}$  для кожної відібраної пари хромосом розігрується точка схрещування (локус). Оскільки кожна хромосома в пулі родичів має  $m$  генів, то точка схрещування  $L_c$  це натуральне число менше  $m$ . Тому фіксація точки схрещування зводиться до вибору натурального

числа із інтервалу  $[1; m - 2]$ . Процес схрещування породжує нову пару хромосом у такий спосіб: перший потомок це хромосома, яка складається із генів першої хромосоми у парі, що розміщені на позиціях від 1 до  $L_c$  та генів другої хромосоми, які знаходяться на позиціях від  $L_c + 1$  до  $m$ ; другий потомок матиме гени другої хромосоми у парі, що знаходяться на позиціях від 1 до  $L_c$  та гени першої хромосоми у парі, які розміщені на позиціях від  $L_c + 1$  до  $m$ .

Для реалізації процесу мутації генерується випадкове число  $P_m$  для кожного гена хромосоми, яка належить пулу родичів і, якщо воно належить інтервалу  $[0;0,1]$ , то значення відповідного гена змінюється з 1 на 0 або з 0 на 1. Хромосоми над якими здійснювались операції схрещування і мутації замінюються новими хромосомами, що отримані у результаті застосування цих двох операцій. У результаті отримуємо поточну популяцію для чергової ітерації з незмінною кількістю хромосом.

Після виконання оператора *Fo* відбувається перехід до оператора *Es*.

Для побудови роздільних ліній між першим і другим та між першим і третім класами (рис. 2) був вибраний поліном другого степеня. Синтез полінома оптимальної складності здійснювався за допомогою розробленого алгоритму, який реалізовано у вигляді програмного забезпечення у середовищі MatLab. Були вибрані такі параметри алгоритму: розмір популяції – 100; максимальна кількість генерацій – 20; ймовірність схрещування – 0,8; ймовірність мутації – 0,1.

У результаті отримали:

- рівняння першої роздільної кривої

$$f(\bar{x}, \bar{a}^{(1)}) = a_0^{(1)} + a_1^{(1)}x_1 + a_2^{(1)}x_2,$$

де  $a_0^{(1)} = 0,7820$ ,  $a_1^{(1)} = 0,1027$ ,  $a_2^{(1)} = -2,5160$ ;

- рівняння другої роздільної кривої

$$f(\bar{x}, \bar{a}^{(2)}) = a_0^{(2)} + a_1^{(2)}x_1 + a_2^{(2)}x_2,$$

де  $a_0^{(2)} = 0,5117$ ,  $a_1^{(2)} = -1,4283$ ,  $a_2^{(2)} = -0,4819$ ;

- рівняння третьої роздільної кривої

$$f(\bar{x}, \bar{a}^{(3)}) = a_0^{(3)} + a_1^{(3)}x_1 + a_2^{(3)}x_2,$$

де  $a_0^{(3)} = -0,3910$ ,  $a_1^{(3)} = 3,2116$ ,  $a_2^{(3)} = -1,2832$ .

Розв'язавши рівняння  $f(\bar{x}, \bar{a}^{(k)}) = 0$ ,  $k = 1, 2, 3$  відносно змінної  $x_2$  отримуємо рівняння роздільних кривих



$$x_2 = -\frac{a_0^{(k)} + a_1^{(k)} x_1}{a_2^{(k)}}, k = 1, 2, 3. \quad (21)$$

Перевіримо чи заєжності (21) утворюють пучок прямих. Для того, щоб три прямі задані рівняннями (21) належали до одного пучка необхідно і достатньо, щоб визначник  $\Delta$ , складений із коефіцієнтів рівняння (21), дорівнював би нулю. Отже, повинна виконуватись умова

$$\Delta = \begin{vmatrix} a_0^{(1)} & a_1^{(1)} & a_2^{(1)} \\ a_0^{(2)} & a_1^{(2)} & a_2^{(2)} \\ a_0^{(3)} & a_1^{(3)} & a_2^{(3)} \end{vmatrix} = 0.$$

Враховуючи параметри функцій (21), обчислюємо  $\Delta = 7,7767 \cdot 10^{-5}$ . Отримане значення близьке до нуля, тому можемо важчати, що прямі (21) утворюють пучок.

На рис. 3 роздільні лінії нанесені на площину ознак. Аналіз рис. 3 показує, що роздільними лініями здійснено майже безпомилкове розділення сукупності ознак на три класи. Тільки третьою роздільною лінією одна ознака із другого класу віднесена до третього хоча нейромережа класифікувала її як ознаку другого класу (рис. 3).

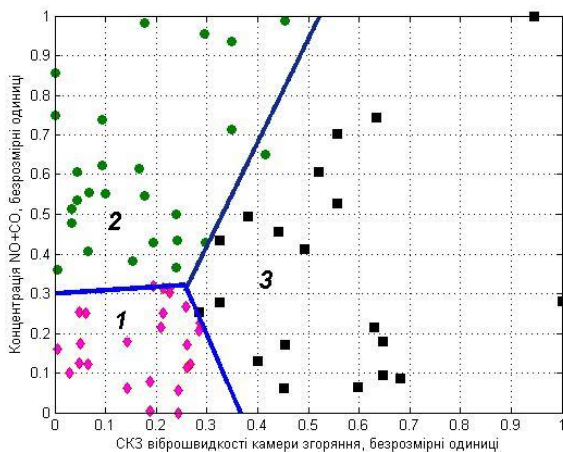


Рисунок 3 – Роздільні лінії між класами.

Таким чином, технічний стан камери згоряння ГТУ характеризується сумарною концентрацією оксидів азоту і вуглецю та СКЗ віброшвидкості корпусу камери згоряння. За допомогою нейромережі Кохонена діагностичні ознаки розбиті на окремі кластери. Розмежування кластерів здійснено за допомогою роздільних ліній, які синтезовані у вигляді поліномів на засадах генетичних алгоритмів. Належність діагностичної ознаки до певного кластера характеризує один із можливих станів камери згоряння ГТУ.

## Висновки

Аналіз літературних джерел і проведені експериментальні дослідження показали, що ознаками технічного стану ГТУ можуть бути сумарна концентрація оксидів азоту і вуглецю та СКЗ віброшвидкості корпусу камери згоряння. За допомогою нейромережі Кохонена площина ознак камери згоряння розбита на три класи, кожний із яких характеризує один із станів ГТУ - «добре», «прийнятно», «допустимо». Границі між класами синтезовані у вигляді поліномів другого степені, параметри якого обчислені за допомогою розробленого генетичного алгоритму шляхом мінімізації певної фітнес-функції.

Отримані результати можуть знайти своє застосування при вирішенні задачі оптимального розподілу навантаження між паралельно працюючими агрегатами компресорної станції магістральної газової мережі.

## Список використаних джерел

- 1 Лозня С. В., Некрасов С. С., Соляник В. Г., Торхов М. И., Френев А. В., Якунин В. Н. Применение средств вибрационной диагностики для защиты от вибрационного горения. // *Вибрация в технике и технологиях*. 2001. № 4(20). С. 57 – 60.
- 2 Виноградов В. Ю., Сайфуллин А. А. Контроль технического состояния авиационных ГТД по акустическим параметрам, измеренным на срезе сопла двигателя. // *Вестник двигателестроения*. 2012. № 2. С. 25 – 29.
- 3 Любчик Г. Н., Варламов Г. Б., Романов В. В., Ванцовский В. Г., Вилкул В. В. Результаты испытаний камеры сгорания ГТД ДГ80 с низкоэмиссионным горелочным устройством на базе трубчатых модулей // *Восточно – Европейский журнал передовых технологий*. 2009. № 4/6 (40). С. 13 – 18.
- 4 Мірзоева О. Ю. Аналіз існуючих методів, моделей, технічних засобів контролю викидів шкідливих речовин з камери згоряння. // *Вісник КрНУ імені Михайла Остроградського*. 2017. Випуск 3 (104). Частина 1. С. 100 – 105.
- 5 Михайлюк Ю. Д. Підвищення рівня екологічної безпеки атмосферного повітря в районах розташування компресорних станцій: дис. ... канд. техн. наук: 21.06.01 / Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу. Івано-Франківськ, 2016. 161 с.
- 6 Лановий М. Д. Аналіз методів і критеріїв оцінювання технічного стану



газоперекачувального агрегату // *Вісник НАУ*. 2010. №2. С. 33 – 39.

7 Горбійчук М. І., Самуляк С.Т. Вібраційний контроль технічного стану газоперекачувальних агрегатів на засадах нейромереж // *Нафтогазова енергетика. Всеукраїнський науково-технічний журнал*. 2009. № 1(10). С. 78– 82.

8 Angelakis C., Loukis E. N., Pouliezios A. D., Stavrakakis G. S. A Neural Network-based Method for Gas Turbine Blading Fault Diagnosis // *International Journal of Modelling and Simulation* . 2001. Vol. 21. No. 1. – P. 51-60.

9 Kong C. , Ki J., Kang M., Kho S. Intelligent performance diagnostics of a gas turbine engine using user-friendly interface neural networks. // *Aircraft Engineering and Aerospace Technology*. 2004, Vol. 76 Iss: 4. P.391 – 397.

10 ДСТУ 3161-95 (ISO 2372, ISO 7919/1, ISO 7919/3). Компресорне обладнання. [Чинний від 1995.07.28]. Вид. офіц. Київ, 1996. 18 с.

11 Патрик Э.А. Основы теории распознавания образов; [пер. с англ.]. М.: Сов. радио, 1980. 408 с.

12 Васильев В. И. Распознающие системы: Справочник. К.: Наукова думка, 1983. 423 с.

13 Мінаєв Ю. М., Вінник Д. М., та ін. Класифікація об'єктів на підставі тензорних моделей // Режим доступу: <http://jrn1.nau.edu.ua/index.php/SBT/article/viewFile/5133/5478>

14 Оссовский С. Нейронные сети для обработки информации; [пер. с польск. И. Д. Рудинского]. М.: Финансы и статистика, 2004. 343с.

15 Мурыгин К. В. Построение классификаторов на основе разделяющих поверхностей // *Штучний інтелект*. 2008. № 2. С. 65 – 69.

16 Горбійчук М. І., Когутяк М. І., Зачук Я. І. Індуктивний метод побудови математичних моделей газоперекачувальних агрегатів природного газу // *Нафтова і газова промисловість*. – 2008. - № 5. – С. 32 – 35.

17 Горбійчук М. І., Пістун Є. П. Числові методи і моделювання на ЕОМ. Івано-Франківськ: Факел, 2010. 402 с.

18 Рутковская Д., Пилиньский М., Рутковский Л. Нейронные сети, генетические алгоритмы и нечеткие системы; [пер. с польск. И. Д. Рудинского]. М.: Горячая линия-Телеком, 2004. 452 с.

#### References

1 Loznia S.V., Nekrasov S.S., Solianik V.G., Torkhov M.I., Frenev A.V., Yakunin V.N. Application of vibration diagnostics for protection

against vibration combustion. *Vibration in engineering and technology*. 2001. No. 4 (20). P. 57 - 60.

2 Vinogradov V. Yu., Saifullin A.A. Control of technical state of aviation GTD on acoustic parameters measured on the section of the engine nozzle. *Journal of Engine Engineering*. 2012. No. 2. P. 25 - 29.

3 Lyubchik G.N., Varlamov G.B., Romanov V.V., Vantsovsky V.G., Vilkul V.V. Test results of a combustion chamber of a GTD DG80 with a low-emission burner device based on tubular modules. *East-European Journal of Advanced Technology*. 2009, No. 4/6 (40). P. 13 - 18.

4 Mirzoeva A.Y. Analysis of existing methods, models, technical means of control of emissions of harmful substances from the combustion chamber. *Bulletin of the Mikhail Ostrogradsky KrNU*. 2017, Issue 3 (104). Part 1. P. 100 - 105.

5 Mikhailuk Yu. D. Increasing the level of environmental safety of atmospheric air in areas of compressor station locations: diss. ... Cand. tech. Sciences: 21.06.01 / Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas. Ivano-Frankivsk, 2016. 161 p.

6 Lanovyi M.D. Analysis of methods and criteria for evaluating the technical state of a gas pumping unit. *Bulletin of the National Academy of Sciences*. 2010, No.2. P 33 - 39.

7 Gorbichuk M.I., Samulak S.T. Vibration control of the technical condition of gas-pumping units on the basis of neural networks. *Oil and gas energy*. 2009. No. 1 (10). P. 78– 82.

8 Angelakis C., Loukis E. N., Pouliezios A. D., Stavrakakis G. S. A Neural Network-Based Method for Gas Turbine Blading Fault Diagnosis. *International Journal of Modeling and Simulation*. 2001. Vol. 21. No. 3 1. P. 51-60.

9 Kong C., Ki J., Kang M., Kho S. Intelligent performance diagnostics of a gas turbine engine using user-friendly interface neural networks. *Aircraft Engineering and Aerospace Technology*. 2004 Vol. 76. Iss: 4. P.391 - 397.

10 DSTU 3161-95 (ISO 2372, ISO 7919/1, ISO 7919/3). Compressor equipment. [Effective 1995.07.28]. Kind. offic. Kyiv, 1996. 18 p.

11 Patrick E.A. Fundamentals of pattern recognition theory; [trans. with English]. М.: Sov. Radio, 1980. 408 p.

12 Vasilyev V.I. Recognizing Systems: A Handbook. К. : Scientific Thought, 1983. 423 p.

13 Minaev Y.M., Vinnik D.M., et al. Object Classification Based on Tensor Models. *Access Mode*:

<http://jrnl.nau.edu.ua/index.php/SBT/article/viewFile/5133/5478>

14 Osovsky S. Neural networks for information processing; [trans. from Poland. ID Rudinsky]. M. : Finances and statistics, 2004. 343 p.

15 Murygin KV Construction of classifiers based on separating surfaces. *Artificial Intelligence*. 2008, No. 2. P. 65 - 69.

16 Gorbichuk M.I., Kogutyak M.I., Zayachuk Y.I. Inductive method of constructing mathematical

models of natural gas pumping units. *Oil and gas industry*. 2008. № 5. P. 32 - 35.

17 Gorbichuk M.I., Pistun E.P. Numerical methods and computer simulations. Ivano-Frankivsk: Torch, 2010. 402 p.

18 Rutkovskaya D., Pilinskiy M., Rutkovskiy L. Neural networks, genetic algorithms and fuzzy systems; [trans. with polish. ID Rudinsky]. M. : Hotline-Telecom, 2004. 452 p.