

681.518(043)  
Щ 96

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ, МОЛОДІ ТА СПОРТУ УКРАЇНИ  
ІВАНО-ФРАНКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
НАФТИ І ГАЗУ**

*Щука*

**Щупак Ігор Володимирович**

043  
УДК 681.518.4

Щ 96

**УДОСКОНАЛЕННЯ МЕТОДІВ КОНТРОЛЮ ТЕХНІЧНОГО СТАНУ  
ГАЗОПЕРЕКАЧУВАЛЬНОГО АГРЕГАТУ НА ЗАСАДАХ ШТУЧНОГО ІНТЕЛЕКТУ**

Спеціальність 05.11.13 – Прилади та методи контролю  
та визначення складу речовин

**Автореферат  
дисертації на здобуття наукового ступеня  
кандидата технічних наук**

**Івано-Франківськ - 2012**



Дисертацією є рукопис.

Робота виконана на кафедрі «Комп'ютерні системи і мережі» в Івано-Франківському національному технічному університеті нафти і газу Міністерства освіти і науки, молоді та спорту України.

**Науковий керівник:** доктор технічних наук, професор  
**Горбійчук Михайло Іванович**  
Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу,  
завідувач кафедри «Комп'ютерних систем і мереж»

**Офіційні опоненти:** доктор технічних наук, професор  
**Заміховський Леонід Михайлович**  
Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу, завідувач кафедри «Комп'ютерних технологій в системах управління та автоматики»

доктор технічних наук, доцент  
**Алексєєв Михайло Олександрович**  
Національний гірничий університет (м. Дніпропетровськ),  
завідувач кафедри «Програмного забезпечення комп'ютерних систем»

Захист відбудеться 10 липня 2012 о 14 годині на засіданні Спеціалізованої вченої ради Д.20.052.03 при Івано-Франківському національному технічному університеті нафти і газу за адресою:  
76019, м. Івано-Франківськ, вул. Карпатська, 15.

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу (76019, м. Івано-Франківськ, вул. Карпатська, 15)

Автореферат розіслано 07 червня 2012 року

Вчений секретар  
Спеціалізованої вченої ради Д.20.052.03,  
кандидат технічних наук, професор

М. М. Дранчук



## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

**Актуальність теми.** Україна є однією з найбільших держав з транзиту газу як внутрішнім споживачам, так і до країн Центральної та Західної Європи. Саме через Україну в Європу транспортується понад 90% експортних обсягів російського газу, що складає 119 – 130 млрд. куб. м за рік. До складу газотранспортної системи входять магістральні газопроводи, які з'єднані з 13 підземними сховищами газу і мають протяжність близько 37 тис. км, 71 компресорна станція (108 компресорних цехів) та 1450 газорозподільних станцій. Загальна кількість газоперекачувальних агрегатів (ГПА) становить 692 одиниці, у тому числі 438 з газотурбінним приводом (ГТПА), 158 з електроприводом (ЕГПА) та 96 газомоторних компресорів.

Підвищення надійності експлуатації газоперекачувальних агрегатів на компресорних станціях і, як наслідок, зменшення витрат на їх обслуговування та ремонт є однією з найважливіших задач у забезпеченні ефективної роботи газотранспортної системи. Вирішення цієї задачі полягає в розробці методів та засобів контролю за технічним станом як самого ГПА в цілому, так і його окремих елементів і вузлів.

Незважаючи на те, що питанням контролю технічного стану ГПА присвячена значне число наукових праць як зарубіжних, так і вітчизняних вчених (С.П. Зарицький, Є.А. Ігуменцев, В.Г. Дубинський, В.А. Щуровський, Л.С. Цегельников, Б.П. Поршаков, В.А. Іванов, В.Я. Грудз, А.П. Толстов, С.А. Саприкін, В.Г. Соляник, Л.М. Заміховський, Б.С. Льченко, В.І. Ізбаш, О.Р. Білоброва, Є.А. Петросяня, Р.Н. Бікентай, Can Gulen, Patrick R. Griffin, Sal Paolucci, Mark Devaney, Bill Cheetham, Kaikko J., Talonpoika T., Sarkoma P. та інші), невіршеними залишаються питання комплексної оцінки технічного стану ГПА, які можуть бути вирішені на базі сучасних методів розпізнавання образів, статистичних методів обробки інформації із залученням технічних засобів передачі, обробки та зберігання значного масиву технологічної інформації.

У переважній більшості на компресорних станціях установлені ГПА з газотурбінними двигунами, енергоносієм яких є природний газ. При запланованих в 2011 році обсягах транспортування газу в 110 млрд. куб. м. газотурбінними двигунами буде спалено приблизно 1,65 млрд. куб. м. природного газу. Спалювання такої кількості природного газу значно погіршує екологічний стан довкілля.

Сучасними штатними засобами контролю за технологічними параметрами компресорних станцій не передбачено вимірювання концентрацій та потужностей викидів продуктів спалювання природного газу в атмосферу. Контроль еколого-технічних характеристик ГПА регламентовано стандартом підприємства, який передбачає проведення еколого-технічних випробувань до і після капітального ремонту ГПА; при введенні в експлуатацію нових та реконструкції (модернізації) ГПА, що знаходяться в експлуатації. В інших випадках такі обстеження проводяться один раз на рік.

Таким чином, незважаючи на значні зусилля багатьох вчених в області контролю технічного стану ГПА, невіршеними залишається цілий ряд задач, зокрема задачі комплексної оцінки стану ГПА та прогнозування шкідливих викидів в атмосферу компресорними станціями. Ці задачі є актуальними оскільки вони дають змогу підвищити ефективність процесу компримування природного газу, перейти від планового обслуговування ГПА до обслуговування їх за технічним станом, а також контролювати у режимі реального часу концентрацію і потужність шкідливих викидів в атмосферу компресорними станціями, що відкриває можливості для оптимізації роботи компресорних станцій з врахуванням їх еколого-технічних характеристик.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.** Вибраний напрямок досліджень є складовою частиною тематичного плану Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу (ІФНТУНГ). Дисертаційна робота виконана у відповідності з основним науковим напрямком діяльності кафедри комп'ютерних систем і мереж ІФНТУНГ. Тематика роботи є частиною планових державних науково-дослідних програм із розвитку нафтогазового комплексу України і базується на результатах держбюджетної роботи «Синтез комп'ютерних систем і мереж для об'єктів нафтогазового комплексу і за навколишнім середовищем» (затверджена Науковою радою ІФНТУНГ 09 жовтня 2009 року, протокол № 5/55) і

МБА

«Синтез комп'ютерних систем та розробка програмного забезпечення для об'єктів нафтогазового комплексу» (номер державної реєстрації 0111U005890). З вищезазначеної наукової тематики автор був безпосереднім виконавцем робіт щодо розробки методів і алгоритмів контролю за технічним станом ГПА і прогнозування концентрацій та потужності викидів компресорними станціями у навколишнє середовище.

**Мета роботи і задачі досліджень.** Метою дисертаційної роботи є розробка методу контролю технічного стану газоперекачувального агрегату та прогнозування його еколого-технічних характеристик на основі інтегрального критерію, синтезованих математичних моделей та розбиття на класи простору ознак технічних станів окремих вузлів на засадах штучного інтелекту для комплексної оцінки поточного стану ГПА та оперативного моніторингу за кількісними та якісними характеристиками вихлопних газів.

Досягнення вказаної мети передбачає вирішення наступних задач:

- проаналізувати літературні джерела з питань контролю за технічним станом ГПА і оперативного моніторингу еколого-технічних характеристик компресорних станцій;
- сформулювати критерій інтегральної оцінки технічного стану газоперекачувальних агрегатів та розробити теоретичні засади визначення інтегральної оцінки технічного стану газоперекачувальних агрегатів;
- розробити методику розбиття площини параметрів контролю на класи за допомогою штучних нейронних мереж та розробити метод і алгоритм побудови роздільних функцій на засадах генетичних алгоритмів;
- створити математичну модель взаємозв'язку еколого-технічних характеристик газотурбінного двигуна з показниками його роботи;
- провести експериментальні дослідження з метою перевірки розроблених методів оцінки технічного стану ГПА та прогнозування його еколого-технічних характеристик;
- синтезувати комп'ютерну систему контролю технічних станів та прогнозування еколого-технічних характеристик газоперекачувальних агрегатів та розробити відповідне програмне забезпечення такої системи.

**Об'єктом дослідження** є інформаційні процеси, що супроводжують компримування природного газу газоперекачувальними агрегатами з газотурбінним приводом.

**Предметом дослідження** є методи та алгоритми оцінки технічного стану газоперекачувальних агрегатів та прогнозування їх еколого-технічних характеристик.

**Методи досліджень.** При вирішенні задач контролю технічного стану ГПА та прогнозування його еколого-технічних характеристик застосовано методи розпізнавання образів за допомогою нейронних мереж для розбиття області параметрів технічних станів на окремі класи; методи побудови роздільних кривих, що визначають границі між класами і які ґрунтуються на ідеях генетичних алгоритмів; методи апроксимації експериментальних даних функціями багатьох змінних, які подані у вигляді полінома певної степені і синтез структури яких здійснюється за допомогою генетичних алгоритмів. При проведенні експериментальних досліджень та обробці отриманого матеріалу використовувались методи математичної статистики, зокрема, для побудови автокореляційних функцій, для визначення обсягу вибірки експериментальних даних при контролі технічного стану об'єктів, для оцінки точності прогнозування за довірливим інтервалом.

**Наукова новизна** отриманих результатів полягає у тому, що

*вперше:*

- розроблений критерій інтегральної оцінки технічного стану газоперекачувального агрегату, який формується шляхом розбиття площини технологічних параметрів окремих вузлів ГПА на класи; кожному із класів присвоюється певний рейтинг; інтегральна оцінка технічного стану визначається як сума рейтингів всіх вузлів ГПА. Інтегральний критерій дає змогу оцінити технічний стан ГПА як «нормальний», «задовільний» або «передавірний», що підвищує ефективність контролю за роботою компресорних станцій і відкриває можливості переходу від планового ремонту до ремонту за технічним станом;
- створена математична модель прогнозування еколого-технічних характеристик ГПА у вигляді поліноміальної залежності концентрації і потужності викидів компресорною станцією у

навколишнє середовище від витрати паливного газу і коефіцієнта корисної дії газотурбінного двигуна, оптимальна структура і коефіцієнти якої визначаються з використанням теорії генетичних алгоритмів, що відкриває можливості для розробки відповідних заходів для зменшення шкідливого впливу працюючих компресорних станцій на навколишнє середовище;

*дістав подальший розвиток:*

- індуктивний метод синтезу математичних моделей, де вибір структури моделі і розрахунок його коефіцієнтів здійснюється шляхом перебору всіх можливих варіантів із вибраної структури полінома з використанням зовнішнього критерію відбору; на відміну від індуктивного запропонований метод формує структуру моделі як хромосому, у якій нуль або одиниця означають, що в поліноміальній залежності відсутня чи присутня певна степінь полінома. Серед сформованих таким чином сімейства хромосом (популяції) за певною процедурою вибирається та, яка забезпечує мінімальне значення зовнішньому критерію (функції пристосування). Це дає змогу значно скоротити затрати на реалізацію алгоритму і реалізувати моделі будь-якої складності;

*удосконалено:*

- метод побудови роздільних кривих, у якому на відміну від існуючого, де рівняння кривої має наперед визначену структуру, як правило, поліноміальну і на основі сформованого критерію визначаються лише параметри такої моделі, синтезується модель на засадах генетичних алгоритмів, що дає змогу визначити не тільки параметри моделі, але й її оптимальну структуру і тим самим підвищити точність побудови границь між класами.

**Практичне значення отриманих результатів.** Теоретичні та експериментальні дослідження дозволили отримати такі практичні результати:

- на основі створених методів та алгоритмів синтезована комп'ютерна система контролю технічного стану та прогнозування еколого-технічних характеристик компресорних станцій, що забезпечує ефективну експлуатацію ГПА та відкриває можливості неперервного моніторингу за концентрацією та потужністю викидів шкідливих речовин в атмосферу;

- запропоновані алгоритми і на їх основі створене програмне забезпечення, що адаптовані для промислового використання у комп'ютерній системі контролю технічного стану та прогнозування еколого-технічних характеристик компресорних станцій;

- розроблений демонстраційний прототип комп'ютерної системи контролю технічного стану та прогнозування еколого-технічних характеристик компресорних станцій, який включає програмне забезпечення та штатні засоби контролю технологічних параметрів компресорних станцій. Очікуваний економічний ефект від впровадження складає 103 тис. грн. (акт від 12.09.2011 р.).

- окремі розділи дисертаційної роботи використанні у навчальному процесі при вивченні дисципліни «Спеціалізовані комп'ютерні системи» студентами спеціальності 6.050102 – комп'ютерні системи та мережі та «Промислові мережі» студентами спеціальності 6.50202 – автоматизація технологічних процесів (акт від 12.10.2011 р.).

**Вірогідність отриманих результатів.** Вірогідність отриманих наукових результатів зумовлена як теоретичними, так і експериментальними дослідженнями, які базуються на ідеї пасивного експерименту, на методі моделювання з використанням теорії генетичних алгоритмів, на методі розвитку множини технологічних параметрів на класи за допомогою нейронних мереж з наступною побудовою роздільних кривих; з широким використанням сучасних програмних продуктів для розв'язку задач класифікації, синтезу математичних моделей та синтезу комп'ютерної системи контролю технічного стану ГПА та прогнозування еколого-технічних характеристик компресорних станцій.

**Особистий висок здобувача** полягає у формуванні мети та задачі дослідження, обґрунтуванні наукових положень, проведенні експериментальних та теоретичних досліджень та розробці методів контролю технічного стану ГПА та прогнозування еколого-технічних характеристик компресорних станцій. Усі положення дисертації, які виносяться на захист, основні результати теоретичних та експериментальних досліджень отримані автором особисто. У надрукованих у співавторстві роботах здобувачеві, зокрема, належить: [1, 2, 10, 11] – розроблена методика визначення інтегрального показника технічного стану відцентрового нагнітача

природного газу; збір експериментального матеріалу; [3, 4] – розроблено алгоритмічне та програмне забезпечення задачі; [5] – розробка методу та програмного забезпечення задачі; проведення відповідних розрахунків з використанням розробленого програмного продукту; [6, 12] – формалізована задача побудови розділних функцій, розроблено алгоритмічне та програмне забезпечення задачі, розроблена методика проведення експериментальних досліджень, зібраний експериментальний матеріал та проведені відповідні розрахунки; [7] – розроблена методика оцінки технічного стану масляної системи газоперекачувального агрегату, проведені експериментальні дослідження на об'єкті; [8, 13] – розроблений метод побудови математичних моделей взаємозв'язку еколого-технічних характеристик газотурбінного двигуна з показниками його роботи, проведення експериментальних досліджень, розрахунок параметрів математичної моделі; [9] – розроблений метод і алгоритм визначення необхідного об'єму вибірки експериментальних даних для розпізнавання технічного стану ГПА, зібраний необхідний експериментальний матеріал і проведені розрахунки за розробленою програмою.

**Апробація результатів дисертації.** Основні положення дисертаційної роботи обговорювались на міжнародній науково-технічній конференції «Нафтогазова енергетика: проблеми та перспективи» (м. Івано-Франківськ, 2009); на міжнародній проблемно-науковій міжгалузевій конференції «Інформаційні проблеми комп'ютерних систем, юриспруденції, енергетики, економіки, моделювання та управління» (м. Бучач, 2010, м. Яремча, 2011); на 18-й міжнародній конференції з автоматичного управління «Автоматика – 2011» (м. Львів, 2011).

**Публікації.** Основні наукові положення та результати дисертаційної роботи опубліковані у 13 роботах, з яких 9 – у виданнях, що входять до переліку ВАК України.

**Структура дисертації.** Дисертація складається із вступу, чотирьох розділів, висновків, додатків і списку використаних джерел. Повний обсяг дисертації складає 196 сторінок, 36 рисунків, додатків на 36 сторінках, списку з 126 найменувань використаних літературних джерел на 14 сторінках.

## ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі обґрунтовано актуальність теми дисертації, сформульовано мету та задачі досліджень, викладено наукову новизну та практичне значення отриманих результатів дисертаційних досліджень, їх апробацію та публікації за темою дисертаційної роботи.

У першому розділі зроблений аналіз сучасного стану наукової задачі контролю технічного стану газоперекачувальних агрегатів з газотурбінним приводом та прогнозування еколого-технічних характеристик ГПА.

Проведений аналіз методів та критеріїв оцінювання технічного стану ГПА показав, що широке застосування знайшли такі методи як параметричні, вібраційні та методи, які засновані на визначенні концентрації металів в оливі.

Суть параметричних методів полягає у тому, що складається математична модель агрегату чи окремого вузла, яка повинна включати як параметр геометричні розміри рухомих елементів ГПА і за їх зміною можна судити про технічний стан ГПА.

Реалізація параметричного методу можлива лише при виконанні таких умов:

модель з високою точністю описує процеси, які характерні для даного вузла чи елемента ГПА;

похибка ідентифікації параметрів моделі повинна бути на порядок меншою ніж зміна геометричних розмірів елементів ГПА.

Очевидно, що такі жорсткі вимоги до методу роблять його застосування досить проблематичним.

Вібраційні методи дають змогу за рівнем вібрації визначати технічний стан корпусів підшипників, ротора, проточної частини компресора та функціональних трубопроводів компресора. У ДСТУ 3161-95 «Компресорне обладнання. Визначення вібраційних характеристик відцентрових компресорів та норми вібрації» рівень вібрації визначається як середньоквадратичне значення віброшвидкості чи віброприскорення. Як відмічає ряд авторів застосування цих показників може привести до помилкових висновків про технічний стан ГПА. Інші методи оцінки

технічного стану ГПА, які ґрунтуються на вивченні властивостей вібросигналів, такі як капспектральний аналіз, Фур'є-аналіз дещо підвищують точність ідентифікації технічних станів ГПА, але алгоритми обробки даних вібромоніторингу значно ускладнюються, що в свою чергу вимагає високої кваліфікації інженерів для інтерпретації отриманих результатів. Інші методи з використанням показника Херста та рангової кореляції для своєї реалізації вимагають великого обсягу експериментальних даних і вони не дають змоги судити про стан ГПА у цілому.

Методи, які засновані на визначенні концентрації металів в оливі мають обмежене застосування, оскільки для їх реалізації необхідна складна і дорога апаратура. Через те, що газотурбінна установка і нагнітач мають спільну масляну систему неможливо ідентифікувати технічний стан кожного із них, а також окремих їх вузлів.

Прогнозування технічних станів ГПА зводиться до визначення його залишкового ресурсу із застосуванням економічних критеріїв, байєсовського методу розділення класів та побудови функціональних залежностей між набором факторів, які визначаються за рівнем вібрації і наробітком ГПА.

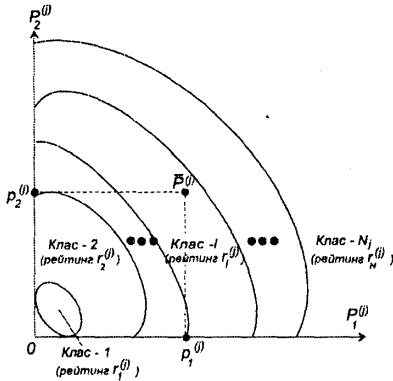
При цьому поза увагою дослідників залишається питання прогнозування еколого-технічних характеристик компресорних станцій, що є важливою передумовою зменшення шкідливих викидів в атмосферу.

Слід зазначити, що кожен із проаналізованих методів дозволяє виявити технічний стан лише одного або декілька вузлів.

Таким чином, напрямком досліджень є розробка методів, алгоритмів і програмного забезпечення для комплексного оцінювання технічного стану ГПА і прогнозування його техніко-екологічних характеристик, що відкриває можливості контролю за шкідливими викидами в атмосфері компресорними станціями, а також дасть змогу перейти від планового ремонту до ремонту за технічним станом і тим самим покращити техніко-економічні показники транспортування природного газу.

У другому розділі викладені теоретичні засади контролю ГПА та прогнозування їх еколого-технічних характеристик; вперше запропонований інтегральний критерій оцінки технічного стану ГПА, який враховує технічні стани як окремих вузлів ГПА, так і його агрегатів. Для розбиття площини показників технічного стану ГПА на окремі класи використано нейронну мережу Кохонена. Межі між класами визначені на основі критерію, який враховує різну ступінь впливу об'єктів у залежності від їх розташування всередині класів; запропонований метод синтезу роздільних функцій, який базується на ідеях генетичних алгоритмів.

Суть методу, що розглядається у наступному. Для певної частини чи вузла ГПА формуються показники їх технічного стану. З плином часу ці сформовані показники змінюють своє значення внаслідок деградації робочих органів ГПА. Якщо побудувати просторі параметрів технічних станів, то значення таких параметрів утворять класи, які будуть відповідати різним станам окремих вузлів чи частинам ГПА (рис. 1). Допустимо, що кожний вузол чи частина характеризується  $s_i^{(j)}$  станами ( $i$  - номер стану;  $j$  - номер вузла чи частини ГПА), які у просторі параметрів утворюють певні класи. Присвоїмо кожному класу певний рейтинг  $r_i^{(j)}$ , значення якого будуть характеризувати технічний стан вузла чи частини ГПА. Нехай у певний момент часу параметри, що характеризують технічний стан вузла чи частини ГПА, у просторі технічних станів відображаються точкою



**Рисунок 1 – Розбиття площини параметрів технічного стану на класи**

$\bar{P}^{(j)}$  (рис.1). У певний період експлуатації ГПА кожній точці  $\bar{P}^{(j)}$  поставимо у відповідність

певний рейтинг  $r^{(j)}$ . Тоді інтегральна оцінка технічного стану ГПА буде визначатись наступним чином:

$$R = r_i^{(1)} + r_k^{(2)} + \dots + r_l^{(M)}, \quad (1)$$

де  $M$  - кількість агрегатів (вузлів) ГПА;

$$i \in \{1, 2, \dots, N_1 - 1\}; k \in \{1, 2, \dots, N_2 - 1\}; \dots; l \in \{1, 2, \dots, N_M - 1\};$$

$N_j, j = \overline{1, M}$  - кількість класів у просторі технічних станів  $j$ -го агрегату (вузла) ГПА.

Останній клас  $N^{(j)}$  відповідає передаварійному станові одному із вузлів (частині) ГПА. Якщо точка  $\bar{P}^{(j)}, j = \overline{1, M}$ , яка характеризує технічний стан вузла  $j$  (частини), попадає в клас  $N_j$ , то стан ГПА у цілому вважається передаварійним.

Якщо тепер технічний стан ГПА охарактеризувати  $K_q$  градаціями (наприклад, «нормальний», «задовільний», «передаварійний»), то при виконанні умови

$$R_{min}^{(q)} \leq R < R_{max}^{(q)}, \quad (2)$$

де  $R_{min}^{(q)}, R_{max}^{(q)}$  - нижня і верхня межі  $K_q$  градації, технічний стан ГПА відносимо до  $K_q$  - градації.

Технічний стан ГПА характеризується певним набором технологічних параметрів. Зміна таких параметрів приводить до зміни технічного стану ГПА, так що сукупність технічних станів можна розглядати як деякий клас об'єктів. Позначимо їх через  $\Omega_1, \Omega_2, \dots, \Omega_m$ . Для того, щоб об'єкти можна було б правильно класифікувати, необхідно мати так звані прецеденти, тобто об'єкти (образи), правильна класифікація яких відома. Ідея прийняття рішень на основі прецедентів є фундаментальною в теорії розпізнавання образів.

Отже, задача розпізнавання образів – це процес, який дозволяє віднести той чи інший об'єкт до певного класу за умови, що класи наперед визначені (відомі прецеденти).

В загальному випадку задачу розпізнавання можна сформулювати у такий спосіб: існує множина  $\Omega$  об'єктів розпізнавання (простір образів) -  $\bar{\omega} \in \Omega$ , де  $\bar{\omega}$  - об'єкт розпізнавання. За допомогою індикаторної функції  $g(\bar{\omega})$ , яка невідома спостерігачу, простір образів розбивається на  $m$  класів, які не перетинаються між собою -  $\Omega_1 \cap \Omega_2 \cap \dots \cap \Omega_m = \emptyset$ , де  $\emptyset$  - пуста множина.

За математичними моделями, які використовують для розв'язку задач розпізнавання образів, розрізняють методи, що ґрунтуються на статистичній природі спостережень, та методи, які засновані на нейромережевих технологіях.

До першої групи методів відносять байєсовський метод та метод мінімального середнього ризику.

При використанні байєсовського методу за основу беруть допущення про існування імовірнісної міри на просторі образів, яка може бути відома або невідома. У такому випадку допускають, що вона може бути оцінена. Мета в тому, щоб синтезувати такий класифікатор (правило розбиття), який буде правильно визначати найвірогідніший клас для пробного образу. Байєсовський класифікатор є оптимальним по відношенню до ймовірності похибки класифікації.

Недоліком цього методу є те, що необхідно постулювати як існування апріорного розподілу для кожного класу  $\Omega_i$ , так і знання його форми.

Суть методу мінімального середнього ризику полягає у тому, що з похибкою класифікації пов'язаний штраф  $\lambda_{ki}$ , який є втратами через те, що об'єкт із класу  $\Omega_k$  був прийнятий за об'єкт із класу  $\Omega_i$ . З похибками класифікації пов'язана матриця втрат  $\Lambda$  з елементами  $\lambda_{ki}$  (власними числами). Знаючи елементи  $\lambda_{ki}$  матриці  $\Lambda$ , можна обчислити ризик при класифікації об'єкта класу. Метод мінімального середнього ризику за  $M$  класами має обмежену зверху ймовірність похибки класифікації, яка може бути значною при малому числі класів, наприклад, при  $M = 2$  будемо мати  $P_e = 0,5$ . Із збільшенням значення  $m$ , ймовірність правильної класифікації зростає. Крім того статистичні методи розпізнавання образів вимагають значної кількості інформації.



Ефективним засобом вирішення задачі розпізнавання образів є нейронні мережі, зокрема мережі Кохонена, Гроссберга та мережі зустрічного поширення. Останні представляють собою об'єднання у єдиній архітектурі нейронних мереж Кохонена і Гроссберга.

Мережі Кохонена функціонують у відповідності з алгоритмом, у якому реалізований принцип конкуренції. Згідно з цим принципом мережа ініціалізується шляхом надання нейроном певних позицій у просторі і зв'язування їх з сусідами на постійній основі, тобто здійснюється функціонування мережі за правилом «переможець отримує все».

Допускається, що у просторі ознак кожний технологічний параметр, який характеризує технічний стан певного вузла ГПА, віднесений до певного класу. Необхідно побудувати роздільну поверхню між першим і другим класами; потім між другим і третім класами і т. д. Отже задача побудови роздільних функцій між  $M$  класами зводиться до побудови роздільних функцій між двома класами.

Нехай перший клас вміщує  $N_o$ , а другий відповідно –  $N_w$  параметрів контролю. Тоді алгоритм знаходження роздільної функції між двома класами ґрунтується на мінімізації наступного функціоналу

$$F(\bar{a}) = \frac{1}{\sum_{i=1}^{N_o} W(f(\bar{x}^{oi}, \bar{a}))} \sum_{i=1}^{N_o} W(f(\bar{x}^{oi}, \bar{a})) (f(\bar{x}^{oi}, \bar{a}) - 1)^2 + \frac{1}{\sum_{i=1}^{N_w} W(f(\bar{x}^{wi}, \bar{a}))} \sum_{i=1}^{N_w} W(f(\bar{x}^{wi}, \bar{a})) (f(\bar{x}^{wi}, \bar{a}) + 1)^2. \quad (3)$$

де  $\bar{a} = (a_0, a_1, \dots, a_n)^T$  - вектор параметрів роздільної функції;  $f(\bar{x}^i, \bar{a})$  - роздільна функція, така, що для першого класу  $f(\bar{x}^{oi}, \bar{a}) \approx 1$ , а для другого –  $f(\bar{x}^{wi}, \bar{a}) \approx -1$ ;  $\bar{x}^i$  - вектор координат параметрів контролю в  $k$ -вимірному просторі (індекс « $o$ » означає, що параметр контролю відноситься до першого класу, а індекс « $w$ » відноситься параметр контролю до другого класу).

Вагова функція  $W(f) = e^{-\beta f^2}$  у формулі (3) враховує параметри контролю, які близькі до межі між класами у більшій степені ніж віддалені від неї. Сталі величини  $\alpha$  і  $\beta$  визначають швидкість зменшення функції (3) при віддаленні її від нульового значення.

У тому випадку, коли роздільна поверхня описується поліномом степені  $r$

$$f(\bar{x}, \bar{a}) = \sum_{k=0}^{n_x-1} a_k \prod_{v=1}^{m_x} x_v^{s_{vk}}, \quad (4)$$

де  $n_p$  - кількість членів полінома;  $a_k$  - коефіцієнти полінома;  $s_{vk}$  - степені аргументів, які повинні задовольняти обмеженню  $\sum_{v=1}^{m_x} s_{vk} \leq r$ .

Число членів  $n_p$  полінома (4) визначають за такою формулою:

$$n_p = \frac{(m_x + r)!}{m_x! r!}, \quad (5)$$

де  $m_x$  - розмірність вектора  $\bar{x}$ .

Таким чином, якщо рівняння роздільної кривої вибрано у вигляді полінома (4), то задача синтезу відповідної роздільної функції між двома класами параметрів контролю зводиться не тільки до визначення вектора параметрів  $\bar{a}$  шляхом мінімізації функціоналу (3), але й до знаходження структури полінома (4) такої, щоб функціонал (3) набув мінімального значення.

Для вирішення поставленої задачі використаємо метод генетичних алгоритмів. Для цього утворимо упорядковану структуру довжиною  $n_p$ , в якій на  $k$ -тому місці буде стояти одиниця або

нуль в залежності від того чи параметр  $a_k$ ,  $k = \overline{0, n_p - 1}$  роздільної функції (4) відмінний від нуля, чи нульовий. У теорії генетичних алгоритмів така упорядкована послідовність носить назву хромосоми або особи, а атомарний елемент хромосоми (одиниця або нуль) – це ген. Набір хромосом утворює популяцію. Важливим поняттям у теорії генетичних алгоритмів є функція пристосування, яка визначає ступінь пристосування окремих осіб у популяції. Вона дає змогу із всієї популяції вибрати особи, які є найбільш пристосованими, тобто такі, які мають найбільше (найменше) значення функції пристосування. У задачі синтезу структури роздільної функції функцією пристосованості виступає функціонал (3).

Таким чином, задачу синтезу роздільної функції сформуємо наступним чином: із початкової популяції хромосом шляхом еволюційного відбору вибрати таку хромосому, яка забезпечує найкраще значення функції пристосування (мінімальне значення функціоналу (3)).

Генетичний алгоритм складається із наступних кроків.

*K1. Формування початкової популяції (ініціалізація).* На першому кроці роботи алгоритму випадковим чином формується популяція із  $l$  осіб, кожна із яких є хромосомою довжиною  $n_p$ . Число генів у хромосомі визначається формулою (5).

*K2. Оцінка пристосованості хромосоми у популяції.* Для кожної хромосоми обчислюється функціонал (3). Здійснюється така процедура наступним чином. Формується поліном  $r$ -тої степені, який асоційований з відповідною хромосомою із популяції  $l$ , тобто у такому поліномі присутні тільки ті  $k$ -ті коефіцієнти, коли на  $k$ -тих позиціях хромосоми розміщені одиниці. Після підстановки отриманого у такий спосіб полінома у вираз (3) формуємо функціонал, який необхідно мінімізувати відносно вектора параметрів  $\bar{a}$  моделі (4). Враховуючи те, що функціонал (3) має досить складну структуру, для його мінімізації був вибраний безградієнтний метод Нелдера-Міда знаходження мінімуму задачі (3). У результаті на кроці  $K2$  отримують значення параметрів  $\bar{a}_d$  моделі (4) та її мінімальне значення  $\min_{\bar{a}_d} F_q(\bar{a}_d)$ ,  $q = \overline{1, l}$ , де  $l$  – кількість одиниць у вибраній хромосомі.

*K3. Перевірка умови зупинки алгоритму.* Для кожної хромосоми обчислюють значення функціоналу (3) –  $F_q(\bar{a}_d)$  і вибирають мінімальне значення серед них:

$$F_{\min}(\bar{a}_d) = \min_{q \in l} F_q(\bar{a}_d). \quad (6)$$

Якщо мінімальне значення (6) критерію селекції (3) не перевершує деякого додатного значення  $\varepsilon$ , то відбувається зупинка алгоритму. Зупинка алгоритму також може відбутися у випадку, коли його виконання не приводить до покращення роздільної функції або у тому випадку, коли алгоритмом уже виконано задане число ітерацій.

Після виконання однієї із трьох умов із популяції вибирається хромосома  $ch^*$ , для якої виконується умова (6). Ця хромосома і задає структуру оптимальної моделі.

*K4. Селекція хромосом.* За розрахованими на другому кроці значеннями роздільної функції здійснюється відбір тих хромосом, які будуть брати участь в створенні потомків для наступної популяції. Такий вибір проводиться у відповідності з принципом природного відбору, коли найбільші шанси у створенні нової популяції мають хромосоми з найкращим значенням функції пристосування, тобто такі, що забезпечують мінімальне значення критерію селекції (3).

Найбільш поширеними методами селекції є метод рулетки і метод турнірної селекції. Метод рулетки можна застосовувати тільки у задачах максимізації. Турнірний метод можна використовувати як у задачах максимізації, так і у задачах мінімізації функцій. При турнірній селекції всі хромосоми розбиваються на підгрупи з наступним вибором із кожної утвореної підгрупи хромосоми з найкращою пристосованістю. Підгрупи можуть мати довільний розмір, але частіше за все популяції ділять на підгрупи по 2 – 3 особи у кожній.

*K5. Формування нової популяції потомків* здійснюється за допомогою двох основних операторів: схрещування і мутації. Слід відмітити, що оператор мутації відіграє другорядну роль у порівнянні з оператором схрещування. Це означає, що у генетичному алгоритмі схрещування проводиться майже завжди, а мутація – досить рідко. Вірогідність схрещування досить велика

( $0,5 \leq P_c \leq 1$ ), тоді як ймовірність мутації вибирається досить малою ( $0 \leq P_m \leq 0,1$ ). Після виконання оператора схрещування відбувається перехід до К2.

Газотранспортна система України має у своєму складі 78 компресорних станцій з 779 працюючими агрегатами як вітчизняного, так і зарубіжного виробництва, у тому числі із газотурбінним приводом. Загальна потужність компресорних станцій складає 5492 МВт. Таким чином, компресорні станції є техногенними об'єктами, які створюють значне екологічне навантаження на навколишнє середовище. Викиди забруднюючих речовин, які контролюються це оксиди азоту  $NO_x$  ( $NO, NO_2$ ), оксиди вуглецю  $CO$  і діоксиду сірки  $SO_2$ . Згідно нормативних документів еколого-технічні випробування газоперекачувальних агрегатів здійснюються до і після ремонту та при введенні в експлуатацію нових і при модернізації ГПА, що знаходяться в експлуатації з періодичністю один рік. Але у процесі експлуатації ГПА змінюються їх технічні характеристики, що приводить погіршення еколого-технічних показників. Тому виникає задача прогнозування з метою оцінки екологічних показників роботи ГПА в залежності від їх технічного стану.

Прогнозні моделі найчастіше вибирають у вигляді регресійних залежностей (4). При цьому об'єкт прогнозування розглядається як деяка система, на вхід якої поступають певні величини  $x_i$ ,  $i = \overline{1, n_x}$ , серед яких може бути і час  $t$ . Результатом дії вхідних величин є реакція системи у вигляді її виходу  $y$ . Таким чином, регресійна модель буде мати вигляд залежності виходу системи  $y$  від її вхідів  $x_i$ ,  $i = \overline{1, n_x}$ .

$$y = f(\bar{x}), \quad (7)$$

де  $\bar{x}$  - вектор вхідних величин з компонентами  $x_i$ ,  $i = \overline{1, n_x}$ .

На практиці регресійна модель (7) вибирається у вигляді полінома (4), структура якого, як правило, невідома, що приводить до необхідності довільного вибору як числа функцій, так і вигляду самих функцій у моделі (4). Для ідентифікації такої моделі здебільшого застосовують метод найменших квадратів (МНК-метод), тобто такий критерій є внутрішнім критерієм і його використання приводить до помилкового правила: чим складніша модель, тим вона точніша. Складність моделі, наприклад поліноміальної, визначається числом членів і найвищою степеню полінома: чим більше членів полінома, тим менше значення критерію у МНК-методі.

Тому для вибору структури моделі (4) був запропонований індуктивний метод самоорганізації моделей, ідейну сторону якого визначає теорема Геделя. Стосовно задачі визначення структури моделі (4) геделівський підхід означає застосування зовнішнього критерію, який дає можливість однозначного вибору єдиної моделі із заданого класу моделей. Критерій називають зовнішнім, якщо його визначення засновано на застосуванні нових даних, які не використовувались при синтезі моделі (4). Це означає, що всі дані, які отримані у результаті експерименту, розбиваються на дві частини  $N_A$  і  $N_B$ . Перша із них - навчальна, а друга - перевірна.

У більшості випадків для вибору структури моделі використовують критерії регулярності

$$\Delta^2(B) = \frac{\sum_{i=1}^{N_A} (Y_i - y_i)^2}{\sum_{i=1}^{N_A} Y_i^2} \quad (8)$$

і мінімуму зміщення

$$\Delta^2(A, B) = \frac{\sum_{i=1}^N (y_i(A) - y_i(B))^2}{\sum_{i=1}^N Y_i^2} \quad (9)$$

Якщо вибраний критерій регулярності (8), то вибирають наступний розподіл даних експерименту:  $N_A = 0,7N$  і  $N_B = 0,3N$ , а при виборі критерію (9) -  $N_A = 0,5N$  і  $N_B = 0,5N$ .

Реалізація індуктивного методу самоорганізації моделей здійснюється поетапно: перший етап – генерація моделей-претендентів (у певному порядку підвищення складності); другий етап – відбір найкращої моделі за критерієм селекції (8) або (9).

Розглянуто три способи генерації моделей-претендентів – комбінаторний, групового урахування аргументів та третій комбінований, який подібний до другого. Різниця лише у тому, що на кожному ряді селекції часткові моделі утворюють шляхом прирівнювання до нуля певного числа їх коефіцієнтів.

Недоліком комбінаторного методу селекції моделей є необхідність перебору великого числа моделей. Якщо вихідною моделлю вибраний повний поліном степені  $r$ , то загальне число моделей-претендентів складає  $2^M - 1$ , де  $M$  - загальне число членів повного полінома степені  $r$ . Навіть сучасні ЕОМ не здатні реалізувати такі алгоритми при значному числі змінних і високій степені полінома. МГУА породжує моделі, у яких фігурують проміжні змінні кожного із рядів селекції, що значно утруднює процес переходу до вхідних змінних системи, що моделюється. Сказане відноситься і до третього методу, оскільки він по суті справи є модифікацією МГУА.

Із усіх трьох методів найпривабливішим є комбінаторний метод, оскільки він дає можливість отримати модель, де аргументами виступають вхідні величини системи. Для зняття проблеми великої розмірності застосуємо генетичний підхід. Як емпіричну модель будемо розглядати поліном степені  $r$ , який визначається формулою (4). Число членів  $n_p$  полінома (4) визначають за формулою (5). Задачу синтезу емпіричної моделі сформуємо наступним чином: із початкової популяції хромосом шляхом еволюційного відбору вибрати таку, хромосому, яка забезпечує найкраще значення функції пристосування (мінімальне значення критерію селекції (8) або (9)). Розроблений генетичний алгоритм синтезу оптимальної структури моделі прогнозу (4) складається із п'яти кроків і він є аналогічним до раніше наведеного алгоритму.

Таким чином, запропонований метод прогнозування техніко-екологічних показників роботи ГПА з використанням генетичних алгоритмів дає змогу на основі функції пристосування синтезувати оптимальну за складністю математичну модель, а також визначити її параметри з використанням результатів експерименту.

У третьому розділі наведено методику проведення експериментальних досліджень з метою перевірки теоретичних досліджень викладених у другому розділі.

Для визначення технічних станів газоперекачувальних агрегатів використовують поточну інформацію про технологічні параметри і вібраційні характеристики окремих вузлів ГПА, які вимірюються і архівуються автоматизованою системою керування. При цьому отримують значний обсяг інформації, що часто затрудняє її інтерпретацію і обробку. Тому актуальною є проблема вибору оптимального обсягу інформації, який дає змогу впевнено розпізнавати технічний стан об'єкта.

На основі теорії збурення матриць отримано критерій вибору обсягу вибірки  $n$

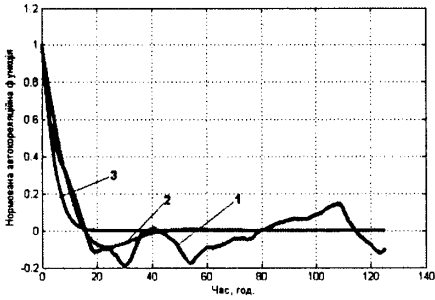
$$J_n = \frac{1}{2} \left( 1 - r \left( \frac{T}{2n} \right) \right), \quad (10)$$

де  $r\left(\frac{T}{2n}\right)$  - нормована автокореляційна функція;  $T$  - час спостереження за випадковим процесом  $x(t)$ .

Вибір обсягу вибірки  $n$  повинен здійснюватись шляхом мінімізації критерію (10) за змінною  $n$ . Якщо такого мінімуму не існує, то задавшись достатньо малим значенням  $\epsilon > 0$ , можна визначити величину  $n$  із умови

$$J_n \leq \epsilon. \quad (11)$$

За експериментальними даними, які отримані у результаті експлуатації нагнітача типу Н-650-21-2 (КС «Ромни» УМГ «Київтрансгаз») була отримана автокореляційна функція температури опорної частини упорного підшипника нагнітача (рис.2).



1 – функція побудована за експериментальними даними,

2 – функція  $r(\tau) = e^{-\alpha\tau} \cos \beta\tau$ ,

3 – функція  $r(\tau) = e^{-\alpha\tau} \left( \cos \beta\tau + \frac{\alpha}{\beta} \sin \beta\tau \right)$

**Рисунок 2 – Графіки нормованих автокореляційних функцій**

За допомогою програмної реалізації відповідного алгоритму для даних рис. 2 були визначені параметри  $\alpha$  і  $\beta$  виразів (12) та (13). Отримані наступні результати:

- для нормованої авто кореляційної функції (12)

$$\alpha = 0,0887 \text{ год}^{-1}, \beta = 0,1015 \text{ год}^{-1}, \min : \varphi(\bar{a}) = 4,5316;$$

- для нормованої авто кореляційної функції (13)

$$\alpha = 0,2868 \text{ год}^{-1}, \beta = 0,1173 \text{ год}^{-1}, \min : \varphi(\bar{a}) = 6,1293.$$

За результатами проведених обчислень побудовані графіки залежностей  $\tilde{r}(\tau)$  і  $r(\tau)$  для співвідношень (12) та (13) (рис. 2).

Аналіз отриманих значень  $\min : \varphi(\bar{a})$  та графіків залежностей (12) і (13) показують, що співвідношення (12) з меншою похибкою апроксимує експериментальні дані  $\tilde{r}(\tau)$  ніж вираз (13).

Таким чином, необхідний обсяг вибірки  $n$  визначений із умови (11), в якій як значення  $r(\tau)$  вибрана функція (12). Аналіз залежності (10) показав, що вона в області додатних значень  $n$  є монотонно спадною функцією. Тому, за заданим значенням величини  $\varepsilon > 0$ , було знайдено

$$\frac{1}{2} \left( 1 - e^{-\frac{\alpha T}{2n}} \cos \frac{T\beta}{2n} \right) - \varepsilon = 0. \quad (15)$$

Рівняння (15) є нелінійним і його числовий розв'язок для даних, які наведені на рис. 2, ( $\Delta\tau = 5 \text{ хв}$  і  $T = 500 \text{ год.}$ ) дав наступний результат:  $n = 278$ .

Іншим параметром, який характеризує технічний стан підшипників відцентрового нагнітача є температура працюючих колодок упорного підшипника нагнітача.

Як і у попередньому випадку був визначений необхідний обсяг вибірки. Для цього було визначено відповідну нормовану автокореляційну функцію і визначені її параметри, що дало змогу визначити  $n_1 = 88$ .

Оскільки  $n \neq n_1$ , то обсяг вибірки, який необхідний для вирішення задачі визначення технічного стану ротора відцентрового нагнітача природного газу, визначимо із умови

$$n_0 = \max(n, n_1).$$

Для випадку, що розглядається  $n_0 = 278$ .

Для апроксимації експериментально отриманих даних  $\tilde{r}(\tau)$  були вибрані залежності

$$r(\tau) = e^{-\alpha\tau} \cos \beta\tau, \quad (12)$$

$$r(\tau) = e^{-\alpha\tau} \left( \cos \beta\tau + \frac{\alpha}{\beta} \sin \beta|\tau| \right). \quad (13)$$

Параметри  $\alpha$  і  $\beta$  співвідношень (12) та (13) розрахуємо за методом найменших квадратів шляхом мінімізації виразу

$$\varphi(\bar{a}) = \sum_{i=1}^m (\tilde{r}(\tau_i) - r(\tau_i))^2, \quad (14)$$

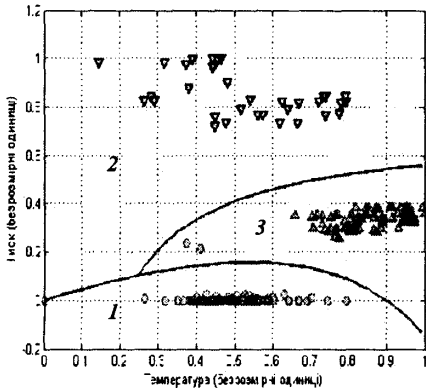
де  $\bar{a} = [\alpha \beta]^T$  - вектор параметрів моделей (12) і (13).

Задача (14) є задачею нелінійного оцінювання параметрів залежностей (12) і (13) і для її вирішення був вибраний метод Ньютона з врахуванням специфіки алгоритмів, які розроблені спеціально для МНК-методу.

Це означає, що при  $n_0 \geq 238$  отримана інформація є достатньою для побудови ефективного алгоритму розпізнавання технічного підшипників нагнітача за температурами опорної частини і працюючих колодок упорного підшипника.

З метою інтегральної оцінки технічного стану ГПА оцінювався технічний стан найвідповідальніших його вузлів – масляної системи, проточної частини та підшипників ВЦН.

На рис. 3 показані результати спостережень за роботою масляної системи на протязі шести місяців, із якого видно, що ознаки контролю за технічним станом (температуру і тиск) можна розбити на три області.



**Рисунок 3 - Розбиття площини параметрів оцінки технічного стану масляної системи на класи за допомогою роздільних кривих**

схрещування – 0,8; ймовірність мутації – 0,1. Для покращення роботи нейромережі діагностичні ознаки температура  $T$  і тиск  $P$  масляної системи ВЦН приведені до безрозмірного вигляду

$$x_i = \frac{X_i - X_{i,\min}}{X_{i,\max} - X_{i,\min}}; \quad i = 1, 2, \quad (16)$$

де  $X_1 = T$ ;  $X_2 = P$ .

У результаті отримали:

- рівняння першої роздільної кривої -  $f(\bar{x}, \bar{c}) = c_1 x_1 + c_2 x_2 + c_3 x_1^2 + c_4 x_1 x_2$ ,

де  $c_1 = 4,231382$ ,  $c_2 = -8,829400$ ,  $c_3 = -4,710281$ ,  $c_4 = 5,569094$ ;

- рівняння другої роздільної кривої -  $f(\bar{x}, \bar{c}) = c_0 + c_1 x_1 + c_2 x_1 x_2$ ,

де  $c_0 = -0,745395$ ,  $c_1 = 3,500560$ ,  $c_2 = -4,923721$ .

Відповідно функціонал (3) набув таких значень:

- для першої роздільної кривої -  $F_{\min}(\bar{c}_d) = 0,07868$ ;

- для другої роздільної кривої -  $F_{\min}(\bar{c}_d) = 0,09315$ .

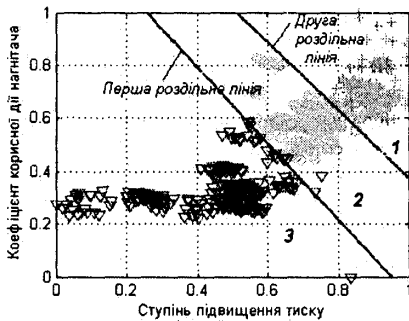
Роздільні криві побудовані шляхом розв'язку рівняння  $f(\bar{x}, \bar{c}) = 0$  відносно змінної  $x_2$ .

Результати такої побудови відтворює рис. 3, із якого видно, що другою роздільною кривою відбулося безпомилкове розмежування другого і третього класів, а перша роздільна крива віднесла дві із загального числа діагностичних ознак до другого класу, хоча нейромережею вони віднесені до першого класу.

Технічний стан проточної частини відцентрового нагнітача ГПА оцінювався за ступенем підвищення тиску  $\epsilon$  та політропним коефіцієнтом корисної дії  $\eta$  нагнітача.

Спостереження за роботою КС «Ромни» УМГ «Київтрансгаз» велись на протязі січня – лютого 2009 року. Для визначення степені підвищення тиску є необхідно знати величину атмосферного тиску. Його значення були взяті із архіву погоди м. Ромни, де значення атмосферного тиску зафіксовані через кожні три години. Оскільки інформаційно-вимірювальна система технологічні параметри ГПА фіксує з дискретністю 5 хв., то для обчислення є необхідно знати  $P_a$  через кожні 5 хв. Таким чином, виникає задача побудови інтерполяційного полінома для визначення значень  $P_a$  поза вузлами інтерполяції. У тих випадках, коли кількість вузлів апроксимації є досить великим немає змісту використовувати інтерполяційні поліноми Ньютон чи Лагранжа. Тому для вирішення поставленої задачі була використана кусково-поліноміальна апроксимація, яка складається із окремих многочленів невисокої степені і які носять назву сплайнів. Був вибраний кубічний сплайн дефекту 1, який на відрізьку часу  $[t_k; t_{k+1}]$ ,  $k = \overline{1, N-1}$  інтерполлює дану функцію  $P_a(t)$  інтерполяційним поліномом.

Як і у попередньому випадку множину параметрів  $\epsilon$  і  $\eta$  за допомогою нейромережі Кохонена розбили на три класи, а границі між першим і другим класами та між другим і третім знайшли за допомогою генетичного алгоритму (рис. 4). На рис. 4 на осі ординат нанесені безрозмірні величини, які обчислювались за формулою (16), де  $X_1 = \epsilon$ ;  $X_2 = \eta$ .



**Рисунок 4 – Розбиття множини параметрів оцінки технічного стану відцентрового нагнітача на класи за допомогою роздільних ліній**

Розбиття множини технічних станів на класи здійснювалось за допомогою прямих ліній, рівняння яких

$$a_0 + a_1 x_1 + a_2 x_2 = 0,$$

де  $a_0 = -3,2809$ ;  $a_1 = 2,5400$ ;  $a_2 = 1,9844$  для першої роздільної лінії і  $a_0 = 2,5245$ ;  $a_1 = -2,6574$ ;

$a_2 = -1,8454$  для другої роздільної лінії.

Досвід експлуатації газоперекачувальних агрегатів показав, що вузькими місцями є вузли ущільнення, упорні, упорно-упорні підшипники нагнітача, блоки насосів. Встановлено, що основними причинами відмов механічної частини нагнітачів є руйнування вузлів і деталей ущільнення, підшипників, насосів змазування нагнітачів та ін. Підшипники виходять із ладу через порушення режимів змащування або через неякісні деталі.

Узагальнення промислової інформації показує, що доля відмов із-за механічних руйнувань складає 8

%.

Відмови механічних елементів, у тому числі і підшипників нагнітачів, тягнуть за собою трудомісткі затрати по їх усуненню. Але відмови механічної частини нагнітачів трудно діагностуються, що у кінцевому підсумку приводить до значних матеріальних затрат через простій обладнання. При недостатньому змащуванні деталей підшипників відбувається підвищення температури його деталей.

Технічний стан підшипників оцінюється температурою опорної частини упорного підшипника та температурою працюючих колодок упорного нагнітача. Аналіз експериментальних даних, які отримані у результаті спостереження за роботою нагнітача на протязі 1373 год., засвідчує, що можна виділити три характерні області, які визначають технічний стан підшипників. За допомогою штучної нейронної мережі всю множину точок доцільно розбити на три класи. Зважаючи на велику кількість точок (16476), для побудови роздільних кривих доцільно зменшити число точок множини. Для цього був визначений необхідний обсяг експериментальних даних з використанням умови (11). У результаті встановлено, що необхідний обсяг вибірки для розбиття множини точок на класи становить  $N_w \geq \max(n, n_1) = 278$ .

Розбиття площини точок на три класи здійснювалось за допомогою мережі Кохонена (рис. 5). Було взято 278 точок. Для побудови роздільних кривих між першою і другою та між другою і третьою множинами був вибраний поліном другої степені

$$f(\bar{x}, \bar{a}) = a_0 + a_1x_1 + a_2x_2 + a_3x_1^2 + a_4x_1x_2 + a_5x_2^2, \quad (17)$$

де  $x_i$  - безрозмірні значення однієї із температур, які обчислені за формулою (16) і у якій  $X_1 = T_1$ ,  $X_2 = T_2$ .

Оптимальна структура роздільної кривої (17), а також її коефіцієнти знайдені з використанням генетичного алгоритму. Параметри алгоритму були такими:  $\alpha = 1$ ;  $\beta = 0,01$ ; розмір популяції - 100; максимальна кількість генерацій - 100; ймовірність схрещування - 0,8; ймовірність мутації - 0,1.

У результаті отримали:

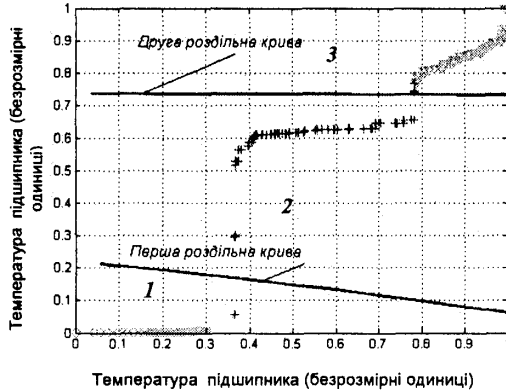
- для першої роздільної кривої

$$a_0 = 1,1175, a_1 = -0,8426, a_2 = -5,8494, a_3 = 0, a_4 = 1,2943, a_5 = 3,5934;$$

- для другої роздільної кривої

$$a_0 = a_1 = a_3 = 0, a_2 = 7,9379, a_4 = -0,04475, a_5 = -10,7697.$$

На рис. 5 зображені роздільні криві, які відділяють перший клас від другого і другий клас від третього. Із аналізу рис. 5 можна зробити висновок, що вся множина точок роздільними кривими



**Рисунок 5 – Розбиття множини параметрів оцінки технічного стану підшипників на площинні**

розбита на три області. При цьому в другу область попала одна точка, а в третю дві точки, які мережею віднесені відповідно до першої і до другої областей, що складає 1 % від загального числа точок.

Технічний стан УОП оцінювався за вібраційним контролем шляхом реєстрації горизонтальних  $X_1 = p_1$  і вертикальних  $X_2 = p_2$  складових віброприскорення за допомогою штатних технічних засобів, якими оснащена компресорна станція КС-3. Для зменшення об'єму вхідної інформації із масиву даних вилучались точки з однаковими координатами. У результаті початковий масив даних скоротився із 273394 до 34 точок. З використанням нейромережі Кохонена множина даних була розбита на три класи. Перший, найнижчий клас (рис. 6) утворюють дані, які характеризують мінімальний рівень вібрації.

Другий клас утворюють дані зі середнім рівнем вібрації і, на кінець, третій, найвищий клас – характеризує високий рівень вібрації.

Для побудови роздільної кривої між першим і другим та між другим і третім класами був вибраний поліном третьої степені. Синтез полінома оптимальної складності здійснювався на основі функціоналу (3) і за допомогою розробленого генетичного алгоритму. Параметри алгоритму були такими як і у попередньому випадку.

У результаті отримали:

- рівняння першої роздільної кривої -  $f(\bar{X}, \bar{a}) = a_0 + a_1X_1 + a_2X_2 + a_3X_1^2$ , де  $a_0 = -0,232874$ ;  $a_1 = 0,264554$ ;  $a_2 = -0,015296$ ;  $a_3 = -0,012428$ ;

- рівняння другої роздільної кривої -  $f(\bar{X}, \bar{a}) = p_0 + a_1X_1$ , де  $a_0 = 7,508388$ ;  $a_1 = -0,305470$ ;



Відповідно функціонал (3) набув таких значень:

- для першої роздільної кривої -

$$F_{\min}(\bar{a}) = 0,1374;$$

- для другої роздільної кривої -

$$F_{\min}(\bar{a}) = 0,8031.$$

Роздільні криві побудовані шляхом розв'язку рівняння  $f(\bar{X}, \bar{a}) = 0$  відносно змінної  $X_2$ .

Після того як для кожного вузла або групи вузлів ГПА побудовані множини їх технічних станів і здійснено розбиття таких множин на класи за допомогою роздільних ліній кожному із класів присвоюється певний рейтинг. Домовимося, що кожному із трьох технічних станів присвоїмо такі назви: «нормальний», «задовільний», «передаварійний». Нехай рейтинг нормального стану – 1, задовільного – 2, а передаварійного – 3. Тоді попадання будь-якого із перерахованих параметрів, які характеризують технічний стан ГПА, в одну із областей, що помічена цифрою «3», буде означати знаходження його у передаварійному стані. Для випадку, що розглядається, нормальний стан ГПА буде мати місце тоді, коли  $R = 4$ . І, нарешті, задовільний стан ГПА буде визначатись умовою, яка витікає із співвідношення (2)

$$R_{\min}^{(2)} \leq R \leq R_{\max}^{(2)},$$

де  $R_{\min}^{(2)} = 5$ ;  $R_{\max}^{(2)} = 8$ .

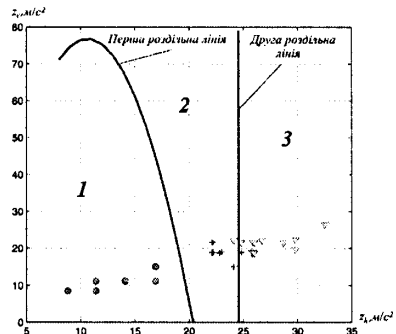
Таким чином, нейромережеві технології дають змогу простір параметрів технічного стану розбити на ряд класів, кожний із яких певним чином характеризує технічний стан ГПА. Побудова роздільних кривих з використанням генетичних алгоритмів, які відділяють один клас від іншого, ґрунтуються на мінімізації функціоналу (3) і забезпечує вибір оптимальних моделей для роздільних ліній. Для інтегральної оцінки технічного стану ГПА вперше запропонований критерій, який визначається як сума рангів, що присвоюються кожному із класів. Розроблена методика дає змогу якісно оцінити технічний стан ГПА, що підвищує їх експлуатаційну надійність.

Останній клас  $N^{(j)}$  відповідає передаварійному станові одному із вузлів (частині) ГПА. Якщо точка  $\bar{P}^{(j)}$ ,  $j = \overline{1, M}$ , яка характеризує технічний стан вузла  $j$  (частини), попадає в клас  $N_j$ , то стан ГПА у цілому вважається передаварійним.

Україна має потужну та розвинуту мережу транспортування газу від східних кордонів до країн Центральної та Західної Європи. У переважній більшості випадків на КС встановлені ГПА з газотурбінним двигуном (ГТД), енергоносієм для яких транспортований газ, на привід яких витрачається 0,5 – 1,5 % від обсягу транспортованого газу. Спалювання такої кількості газу погіршує екологічну ситуацію навколишнього середовища.

Аналіз літературних джерел показує, що практично відсутні роботи з дослідження взаємозв'язку технічного стану ГПА з вмістом забруднюючих речовин у відхідних газах. Отже, однією із задач роботи є побудова емпіричної моделі функціонального зв'язку між технічним станом ГПА і його екологічними характеристиками для оперативного контролю і прогнозування вмісту забруднюючих речовин у відхідних газах. Актуальність роботи підсилює ще той факт, що на сьогоднішній день на ГПА не здійснюється поточний і неперервний контроль вмісту шкідливих речовин у відхідних газах.

Викиди забруднюючих речовин (ЗР), які контролюють при комплексному обстеженні технологічного обладнання компресорних станцій (до і після капітального ремонту; при веденні в експлуатацію нових та реконструкції ГПА, що знаходяться в експлуатації; один раз на рік), це



**Рисунок 6 – Розбиття множини параметрів оцінки технічного стану УОП на класи за допомогою роздільних ліній**

оксиди азоту  $NO_x$  ( $NO$ ,  $NO_2$ ), окису вуглецю  $CO$  і діоксиду сірки  $SO_2$  (за наявністю). Засобами вимірювання концентрацій ЗР є прилад TESTO – 350 або інші, які мають аналогічні метрологічні характеристики.

На стан навколишнього середовища впливає не скільки концентрація оксиди азоту  $NO_2$ , окису вуглецю у продуктах згорання як потужність їх викидів в атмосферу, які, очевидно залежать від кількості спалюваного природного газу  $q$  і від технічного стану ГТД.

Технічний стан ГТД будемо характеризувати його коефіцієнтом корисної дії (к.к.д.)  $\eta$ . Тоді

$$M_i = f_i(q, \eta), \quad i = \overline{1, 4}, \quad (18)$$

де  $M_1 = M_{NO}$ ;  $M_2 = M_{CO}$ ;  $M_3 = M_{NO}$ ;  $M_4 = M_{NO_2}$ ;  $q$  - витрата паливного газу за нормальних умов.

Емпіричну модель (18) будемо шукати у вигляді полінома (4)

Використовуючи розроблену методику, у середовищі MatLab синтезована програма, яка дала змогу отримати емпіричні моделі (18) у вигляді полінома (4) за допомогою розробленого генетичного алгоритму.

Як приклад застосування розробленої методики синтезована емпірична модель потужності викидів  $CO$  в залежності від  $q$  і  $\eta$  (екологічні обстеження проводились з 10.05.2005 року по 24.09.2008 року). Були вибрані такі параметри програми: степінь полінома -  $r = 5$ , ймовірність схрещування  $p_c = 0,8$ , ймовірність мутації  $p_m = 0,01$ . Як критерій селекції був вибраний критерій регулярності (8). Для підвищення точності моделі змінні  $M_2$ ,  $q$  і  $\eta$  приведені до безрозмірного виду за формулами, які аналогічні (16).

У результаті емпіричного моделювання з використанням генетичного алгоритму отриманий наступний результат:

$$y = a_4 x_1 x_2 + a_7 x_1^2 x_2 + a_9 x_2^3 + a_{10} x_1^4 + a_{11} x_1^3 x_2 + a_{14} x_2^4 + a_{16} x_1^4 x_2 + a_{17} x_1^3 x_2^2, \quad (19)$$

де  $x_j$ ,  $j = 1, 2$  - одна із величин  $q$ ,  $\eta$ , що приведені до безрозмірного виду;  $a_4 = 0,54497$ ,  $a_7 = -3,1040$ ,  $a_9 = 6,94064$ ,  $a_{10} = 2,14598$ ,  $a_{11} = -6,34259$ ,  $a_{14} = -5,55779$ ,  $a_{16} = -0,50410$ ,  $a_{17} = 6,78187$ .

Адекватність моделі (19) перевірялась за допомогою коефіцієнта кореляції  $K_{y_j}$  між експериментальними  $Y_j = M_2^{(i)}$  та розрахунковими за формулою (19) значеннями  $y_j$ . Було отримано:  $K_{y_j} = 0,998$ , що свідчить про високу степінь кореляції між величинами  $Y_i$  і  $y_j$ .

Таким чином, отримані емпіричні моделі взаємозв'язку техніко-екологічних параметрів з витратою паливного газу і к. к. д. ГТД на засадах генетичних алгоритмів дають змогу прогнозувати потужності викидів оксидів азоту  $NO_x$  ( $NO$ ,  $NO_2$ ) та окису вуглецю  $CO$ , що є актуальною задачею при визначенні технічного стану ГПА. Наявність таких моделей відкриває шляхи до вибору таких режимних параметрів, які забезпечили б мінімізацію викидів в атмосферу шкідливих речовин при заданих обсягах перекачки природного газу.

Оцінена точність прогнозування концентрації та потужності викидів в атмосферу шкідливих речовин шляхом побудови довірливих інтервалів, що дало змогу встановити, що для табульованої  $q_i$ - тої межі розподілу Стьюдента ( $q_i = 0,05$ ) ймовірність попадання прогнозованих значень у довірливий інтервал не менше ніж 0,92.

У четвертому розділі здійснено синтез структурної схеми системи контролю технічних станів ГПА та прогнозування його еколого-технічних характеристик на базі типових структур систем контролю вібрації та автоматизованої системи управління технологічними процесами (рис. 7). На нижньому рівні системи контролю технічних станів ГПА є два джерела отримання інформації – це давачі технологічних параметрів та вібродавачі.

Сигнали від давачів технологічних параметрів поступають до програмованих логічних контролерів (GE FANUC 90-70 і 90-30), які з'єднані між собою мережею Genius в межах компресорної станції. Вони призначені для збору та попередньої обробки інформації. Обробка та

видача інформації, яка через пристрій реєстрації поступає до бази даних, за допомогою пакета прикладних програм. Для програмування використовуються графічні мови LD (Ladder Diagram) або FBD (Functional Block Diagram), які охоплює стандарт ІЕС 1131-3.

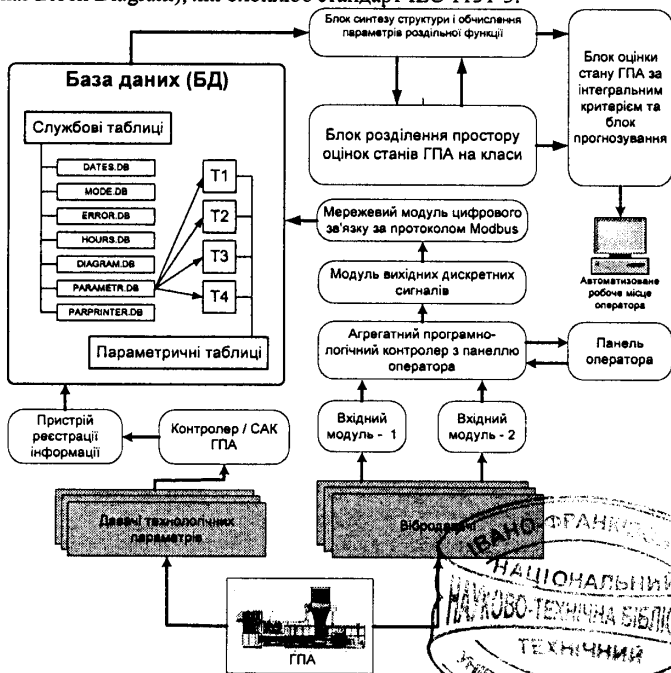


Рисунок 7 – Структурна схема системи контролю технічних станів ГПА та прогнозування його еколого-технічних характеристик

Група вібродавачів (рис. 7) забезпечує контроль таких параметрів як вібропереміщення ротора нагнітача у районі опорного підшипника, віброшвидкість корпусу компресора низького тиску, СКЗ віброшвидкості корпусу силової турбіни, осьовий зсув ротора нагнітача, вібропереміщення ротора нагнітача в районі упорного підшипника і СКЗ віброшвидкості корпусу камери згорання.

Сигнали від вібродавачів поступають на вхідні модулі 1 і 2, де вони перетворюються в стандартні сигнали постійного та змінного струму.

Агрегатний програмно-логічний контролер сприймає сигнали від модулів 1 і 2 і через модуль вихідних дискретних сигналів посилає до бази даних. Ця передача інформації забезпечується цифровим інтерфейсом RS 485 з протоколом Modbus RTU.

Мережевий модуль може бути створений на базі промислового комп'ютера з використанням спеціальної карти АЦП (аналогово-цифрове перетворення), який взаємодіє з сервером цехового рівня по мережі Ethernet (протокол TCP/IP).

На верхньому операторському рівні (рис. 7) відбувається прогнозування еколого-технічних характеристик та технічного стану ГПА за допомогою блоків розділення просторів станів, синтезу структури і обчислення параметрів роздільної функції та блоку оцінки стану ГПА за інтегральним критерієм. Операторський рівень побудований на базі промислового комп'ютера з прикладним програмним забезпеченням, яке інтегровано в SCADA-систему.

У додатках наведено допоміжні матеріали, а також акти про впровадження отриманих теоретичних та практичних результатів.

## ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі наведено теоретичне узагальнення і вирішення актуальної науково-технічної задачі, яка полягає у розробці на засадах штучного інтелекту методу і алгоритмів контролю за технічним станом ГПА та прогнозування шкідливих викидів компресорними станціями в атмосферу і, на цій основі, синтезі відповідної комп'ютерної системи. Вирішення цієї задачі має важливе значення для газотранспортної системи України, оскільки дає змогу підвищити експлуатаційну надійність роботи ГПА, здійснювати технічні заходи зі зменшення шкідливих викидів компресорними станціями у навколишнє середовище.

1. Аналіз стану задачі виявив, що, незважаючи на значне число публікацій з тематики контролю за технічним станом ГПА, у них відсутній комплексний підхід до визначення технічного стану ГПА, який ґрунтувався би на єдиному критерієві і враховував би технічні стани його окремих елементів і вузлів. При цьому поза увагою дослідників залишається питання прогнозування концентрації та потужності викидів компресорними станціями продуктів згорання в атмосферу. Ця задача на сьогоднішній день є актуальною, оскільки її вирішення дає змогу перейти від планового ремонту до ремонту за технічним станом та відкриває можливості ефективного контролю за шкідливими викидами в атмосфері компресорними станціями.

2. Сформований критерій інтегральної оцінки технічного стану ГПА, який враховує технічні стани елементів і вузлів ГПА шляхом розбиття площин параметрів контролю на класи; кожному із класів присвоюється певний рейтинг. Тоді інтегральний критерій оцінки визначається як сума всіх рейтингів елементів і вузлів ГПА. Визначені межі значень інтегральної оцінки, за допомогою яких технічний стан ГПА можна віднести до одного із трьох класів «нормальний», «задовільний» та «передаварійний».

3. Розроблена методика віднесення параметрів контролю елемента чи вузла ГПА до певного класу за допомогою штучних нейромереж, що дає змогу віднести поточний стан елементів або вузлів ГПА до одного із трьох класів кожному із яких прописаний певний рейтинг і тим самим оцінити за інтегральним показником технічний стан ГПА у цілому.

4. Розроблено метод побудови роздільних кривих, що на відміну від існуючих, де роздільна крива фіксованої структури вибирається таким чином, щоб мінімізувати критерій максимального наближення кривої до точок двох класів, дає змогу синтезувати як структуру роздільної кривої, так і обчислити параметри синтезованої моделі роздільної кривої на засадах генетичних алгоритмів, що дало змогу ефективніше у порівнянні з існуючим методом визначити межі між двома класами на площині параметрів контролю.

5. Створено математичну модель взаємозв'язку еколого-технічних характеристик газотурбінного двигуна з витратою паливного газу і його коефіцієнтом корисної дії на основі розробленого методу, суть якого полягає у тому, що для вибраної поліноміальної моделі утворюють структуру із такої кількості елементів скільки членів вміщує регресійна модель; якщо деякий параметр такої моделі відмінний від нуля, то у створеній структурі йому приписуємо значення одиниці, або нуля у протилежному випадку. Утворена у такий спосіб структура носить назву хромосоми, а їх набір складає популяцію. Тепер задача синтезу математичної моделі оптимальної структури зведена до еволюційного відбору із початкової популяції хромосом такої хромосоми, яка забезпечує найкраще значення функції пристосування. Розроблений метод синтезу математичної моделі значно скорочує затрати машинного часу на розв'язок поставленої задачі у порівнянні з індуктивним методом, що практично дає змогу побудувати модель будь-якої складності при обмеженому обсягові експериментальних даних.

6. Для перевірки розроблених методів проведені експериментальні дослідження, які дали змогу для основних елементів ГПА за допомогою нейронних мереж площини параметрів контролю розбити на окремі класи; з використанням розробленого методу, який базується на засадах генетичних алгоритмів, побудовані роздільні криві, що визначають межі між сусідніми класами. Кожному із класів присвоєно певний рейтинг, що дало змогу кількісно оцінити значення інтегрального критерію і тим самим за поточними значеннями параметрів контролю визначити технічний стан ГПА. З використанням експериментальних даних на засадах генетичних

алгоритмів побудована регресійна залежність між концентраціями і потужностями викидів продуктів згорання та витратою паливного газу і коефіцієнтом корисної дії газотурбінного двигуна, що відкриває можливості для оптимального керування роботою ГПА з врахуванням його еколого-технічних характеристик. Шляхом побудови довірчих інтервалів встановлено, що для табульованої  $q$ -тої межі розподілу Стьюдента ( $q = 0,05$ ) ймовірність попадання прогнозованих значень у довірливий інтервал не менше ніж 0,92.

7. Синтезована комп'ютерна система контролю технічних станів та прогнозування еколого-технічних характеристик газоперекачувальних агрегатів та розроблене відповідне програмне забезпечення такої системи на основі методів розділення площини параметрів контролю на класи, інтегрального критерію оцінки технічного стану ГПА та розробленого методу синтезу оптимальних моделей. Система прийнята до впровадження в УМГ «Київтрансгаз» і очікуваний економічний ефект становить 103 тис. грн. за рахунок переходу від проведення планового ремонту до ремонту за його фактичним технічним станом. Крім того з'явиться можливість ефективного контролю за шкідливими викидами в атмосферу продуктів згорання паливного газу на компресорних станціях.

8. Алгоритмічне та програмне забезпечення комп'ютерної системи контролю технічного стану ГПА та прогнозування еколого-технічних характеристик впроваджені в навчальний процес кафедри комп'ютерних систем та мереж в наступних дисциплінах: "Промислові мережі" для студентів спеціальності 6.050202 – Автоматизоване управління технологічними процесами; "Спеціалізовані комп'ютерні системи" для студентів спеціальності 6.050102 – Комп'ютерні системи та мережі.

### СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Горбійчук М. І. Інтегральні діагностичні ознаки технічного стану відцентрових нагнітачів природного газу / М. І. Горбійчук, С. Т. Самуляк, І. В. Щупак // *Методи та прилади контролю якості*. – 2009. – № 22. – С. 17 – 21.
2. Горбійчук М. І. Метод інтегральної оцінки технічного стану газоперекачувальних агрегатів / М. І. Горбійчук, І. В. Щупак, В. Л. Кімак // *Нафтогазова енергетика. Всеукраїнський науково-технічний журнал*. – 2010. – № 2(13). – С. 38 – 43.
3. Горбійчук М. І. Інформаційні показники технічного стану газоперекачувальних агрегатів природного газу // М. І. Горбійчук, Б. В. Копей, А.Беллауар, І. В. Щупак // *Методи та прилади контролю якості*. – 2008. – № 20. – С. 47 – 50.
4. Горбійчук М. І. Вплив факторів роботи газоперекачувальних агрегатів на час їх напрацювання / М. І. Горбійчук, Б. В. Копей, А.Беллауар, І. В. Щупак // *Нафтогазова енергетика. Всеукраїнський науково-технічний журнал*. – 2008. – № 3 (8). – С. 55 – 58.
5. Горбійчук М. І. Синтез функцій класифікації на основі генетичних алгоритмів / М. І. Горбійчук, С. Т. Самуляк, І. В. Щупак // *Штучний інтелект*. – 2010. – № 2. – С. 24 – 31.
6. Горбійчук М. І. Метод синтезу емпіричних моделей на засадах генетичних алгоритмів / М. І. Горбійчук, М. І. Когутяк, І. В. Щупак, О. Б. Василенко // *Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ*. – 2009. – № 4 (33). – С. 72-79
7. Горбійчук М. І. Діагностична модель системи змашування нагнітача природного газу / М. І. Горбійчук, І. В. Щупак // *Науковий вісник Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу*. – 2010. – № 3 (25). – С. 130 – 137.
8. Горбійчук М. І. Математичне моделювання взаємозв'язку еколого-технічних характеристик газотурбінного двигуна з показниками його роботи / М. І. Горбійчук, І. В. Щупак // *Методи та прилади контролю якості*. – 2010. – № 24. – С. 78– 83.
9. Горбійчук М. І. Визначення об'єму вибірки експериментальних даних під час контролю технічного стану об'єкта / М. І. Горбійчук, І. В. Щупак // *Нафтогазова енергетика. Всеукраїнський науково-технічний журнал*. – 2011. – № 1(14). – С. 109– 114.
10. Горбійчук М. І. Метод визначення технічного стану газоперекачувальних агрегатів на засадах нейронних мереж / М. І. Горбійчук, І. В. Щупак // *Матеріали міжнародної проблемно-наукової міжгалузевої конференції «Інформаційні проблеми комп'ютерних систем,*

юриспруденції, енергетики, економіки, моделювання та управління»: Поступ в науку, 01-04 червня 2010 р. – Бучач, 2010. – С. 323 – 327.

11. Горбійчук М. І. Оцінка технічного стану газоперекачувальних агрегатів за інтегральними показниками / М. І. Горбійчук, І. В. Щупак // Матеріали міжнародної проблемно-наукової міжгалузевої конференції «Інформаційні проблеми комп'ютерних систем, юриспруденції, енергетики, економіки, моделювання та управління»: Поступ в науку, 17-20 травня 2011 р. – Бучач, 2011. – С. 383–387.

12. Горбійчук М. І. Метод синтезу емпіричних моделей на засадах генетичних алгоритмів / М. І. Горбійчук, М. І. Когутяк, О. Б. Василенко, І. В. Щупак // Міжнародна науково-технічна конференція «Нафтогазова енергетика: проблеми та перспективи». Івано-Франківськ, 20-23 жовтня 2009 р. – С. 109.

13. Горбійчук М. І. Математичні моделі прогнозування викидів компресорними станціями шкідливих речовин в атмосферу / М. І. Горбійчук, І. В. Щупак // Автоматика-2011: 18 Міжнародна конференція з автоматичного управління. Львів, 28 – 30 вересня 2011 р. – Львів, 2011- С. 84 – 85.

#### АНОТАЦІЯ

**Щупак І. В.** *Удосконалення методів контролю технічного стану газоперекачувального агрегату на засадах штучного інтелекту.* – Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.11.13 – Прилади та методи контролю та визначення складу речовин. – Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу. – Івано-Франківськ. – 2012.

Дисертацію присвячено розробці методу оцінки технічного стану газоперекачувальних агрегатів та прогнозування їх еколого-технічних характеристик, що дозволяє комплексно оцінювати працездатність ГПА та оперативно контролювати потужність викидів шкідливих речовин компресорними станціями у навколишнє середовище, а це відкриває можливості до оптимізації процесу компримування природного газу з врахуванням впливу роботи ГПА на навколишнє середовище.

На базі теоретичних досліджень вперше запропонований інтегральний критерій оцінки технічного стану ГПА, суть якого у тому, що для вибраних вузлів ГПА визначається певний рейтинг і за сумарним рейтингом судять про технічний стан ГПА. Для визначення рейтингу окремого вузла ГПА виявлені параметри оцінки технічного стану, які на за допомогою нейронної мережі розбиваються на класи; границі між класами визначають роздільні криві, які синтезовані у вигляді оптимального полінома певної степені за допомогою генетичних алгоритмів.

Запропонований метод прогнозування еколого-технічних характеристик ГПА дає змогу побудувати прогнозну модель оптимальної складності із застосуванням генетичних алгоритмів. Оцінена точність прогнозування концентрації та потужності викидів в атмосферу шкідливих речовин шляхом побудови довірливих інтервалів.

Синтезовано структуру та розроблено алгоритмічне та програмне забезпечення комп'ютерної системи оцінки технічного стану ГПА та прогнозування його еколого-технічних характеристик.

**Ключові слова:** технічний стан, прогнозування, ГПА, еколого-технічні характеристики, інтегральний критерій, рейтинг, нейронна мережа, генетичний алгоритм, комп'ютерна система.

#### АНОТАЦІЯ

**Щупак І. В.** *Усовершенствование методов контроля технического состояния газоперекачивающего агрегата на принципах искусственного интеллекта.* – Рукопись.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.11.13 – Приборы и методы контроля и определения состава веществ. – Ивано-Франковский национальный технический университет нефти и газа. – Ивано-Франковск. – 2012.

В первом разделе проанализированы методы оценки технического состояния газоперекачивающих агрегатов (ГПА) с газотурбинным приводом та прогнозирование эколого-технических характеристик ГПА.

Проведенный анализ методов и контроля оценивания технического состояния ГПА показал, что широкое применения нашли такие методы как параметрические, вибрационные и методы, которые основаны на определении концентрации металлов в масле.

Суть параметрических методов состоит в том, что строится математическая модель агрегата или отдельного узла, которая должна включать как параметр геометрические размеры подвижных элементов ГПА и по их изменению судить о техническом состоянии ГПА.

Реализация параметрического метода возможна только при выполнении таких условий:

модель с высокой точностью описывает процессы, которые характерны для данного узла или элемента ГПА;

погрешность идентификации параметров модели должна быть на порядок меньше чем изменение размеров элементов ГПА.

Очевидно, что такие жесткие требования к методу делают его применение достаточно проблематичным.

Методы, которые основаны на определении концентрации металлов в масле имеют ограниченное применение, так как для их реализации необходима сложная и дорогая аппаратура. Из-за того, что газотурбинная установка и нагнетатель имеют общую масляную систему невозможно идентифицировать техническое состояние кожного из них, а также отдельных его узлов.

Прогнозирование технического состояния ГПА сводится к определению его остаточного ресурса с применением экономических критериев, байесовского метода разделения классов и построения функциональных зависимостей между набором факторов, которые определяются по уровню вибрации и наработкой ГПА.

При этом вне внимания исследователей остается вопрос прогнозирования эколого-технических характеристик компрессорных станций, что является важным предисловием уменьшения вредных выбросов в атмосферу.

Таким образом, направлением исследования является разработка методов, алгоритмов и программного обеспечения для комплексного оценивания технического состояния ГПА и прогнозирования его эколого-технических характеристик, что открывает возможности контроля над вредными выбросами в атмосферу компрессорными станциями, а также даст возможность перейти от планового ремонта к ремонту по техническому состоянию и тем самым улучшить технико-экономические показатели транспортирования природного газа.

Во **втором** разделе изложены теоретические основы контроля ГПА и прогнозирования их эколого-технических характеристик; впервые предложен интегральный критерий оценки технического состояния ГПА, который учитывает технические состояния, как отдельных узлов, так и его отдельных агрегатов. Для разбиения плоскости показателей технического состояния ГПА на отдельные классы использовано нейронную сеть Кохонена. Границы между классами определены на основе критерия, который учитывает разную степень влияния от их размещения внутри классов; предложен метод построения синтеза разделительных функций, который базируется на идеях генетических алгоритмов.

В **третьем** разделе наведена методика экспериментальных исследований с целью проверки теоретических исследований изложенных во втором разделе.

Исходя из теории возмущения матриц, получен критерий, на основании которого определен необходимый объем экспериментальных данных для решения задач распознавания технических состояний отдельных узлов ГПА. С использованием экспериментальных данных осуществлена проверка методики оценивания технических состояний таких узлов как масляная система, проточная часть центробежного нагнетателя и подшипники ГПА. Учитывая то, что компрессорные станции есть мощными источниками вредных веществ, поставлена и решена задача прогнозирования эколого-технических характеристик ГПА. Для определения оценок технического состояния ГПА и прогнозирования его эколого-технических характеристик широко использованы теория нейронных сетей и теория генетических алгоритмов, что дало возможность синтезировать как уравнения разделительных кривых, так и зависимости, что определяют эколого-технические характеристики ГПА.

В четвертом разделе осуществлен синтез структурной схемы системы контроля технических состояний ГПА и прогнозирования его эколого-технических характеристик на базе типовых структур систем контроля вибрации та автоматизированной системы управления технологическим процессом компримирования природного газа.

Система синтезирована как двухуровневая – на первом уровне осуществляется измерение, сбор и сохранение необходимой информации; на втором операторском уровне осуществляется прогнозирование эколого-технических характеристик ГПА и оценка технического состояния ГПА при помощи блоков разделения пространства состояний на классы, синтеза структуры и вычисления параметров разделительной кривой и блока комплексной оценки состояния ГПА по интегральному критерию. Операторский уровень построен на базе промышленного компьютера с прикладным программным обеспечением, которое интегрировано в SCADA-систему.

**Ключевые слова:** техническое состояние, прогнозирование, ГПА, эколого-технические характеристики, интегральный критерий, рейтинг, нейронная сеть, генетический алгоритм, компьютерная система.

#### ABSTRACT

**Shchupak I. V.** *An improvement of methods of control of the technical state of gascompressor unit is on principles of artificial intelligence.* It is Manuscript.

Dissertation on the receipt of scientific degree of candidate of engineering's sciences after speciality 05.11.13 - Devices and methods of control and determination of composition of matters. Ivano-Frankivsk national technical university of oil and gas. Ivano-Frankivsk – 2012.

Dissertation is devoted to development of method of estimation of the technical state of gas compressor units (GCU) and prognostication of them ecological descriptions, that allows complex to estimate the capacity of GCU and operatively to control power of extras of harmful matters the compressor stations in an environment, and it opens possibilities to optimization of process of compression of natural gas taking into account influence of work of GCU on an environment.

On the base of theoretical researches the integral criterion of estimation of the technical state of GCU, essence of which in that for the chosen knots of GCU the certain rating is determined after the total rating judge about the technical state of GCU, is first offered. For determination of rating of separate knot of GCU found out parameters estimations of the technical state, which on by a neuron network broken up on classes; scopes between classes determine separate curves which are synthesized as an optimum polynomial of certain degrees by genetic algorithms.

Offered method of prognostication environmental and technical descriptions of GCU enables to build the prognosis model of optimum complication with application of genetic algorithms. The appraised exactness of prognostication of concentration and power of extras is in the atmosphere of harmful matters by the construction of trustful intervals.

A structure is synthesized and the algorithmic and programmatic providing of the computer system of estimation of the technical state of GCU and prognostication of him is developed ecological descriptions.

**Keywords:** technical state, prognostication, GCU, ecological descriptions, integral criterion, rating, neuron network, genetic algorithm, computer system.