

681.518.5.015 : 621.515(043)

Г 20

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
ІВАНО-ФРАНКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ  
УНІВЕРСИТЕТ НАФТИ І ГАЗУ

ГАРАСИМІВ ВІРА МИХАЙЛІВНА



УДК 681.518.5.015:621.515

**ІДЕНТИФІКАЦІЯ ТА КОНТРОЛЬ ПАРАМЕТРІВ ДВОСТУПЕНЕВОГО  
НАГНІТАЧА ПРИРОДНОГО ГАЗУ ІЗ ВИКОРИСТАННЯМ МЕТОДІВ  
ШТУЧНОГО ІНТЕЛЕКТУ**

Спеціальність 05.13.07 – автоматизація процесів керування

**АВТОРЕФЕРАТ**

дисертації на здобуття наукового ступеня  
кандидата технічних наук

Івано-Франківськ – 2018

Дисертацією є рукопис

Робота виконана в Івано-Франківському національному технічному університеті нафти і газу Міністерства освіти і науки України

**Науковий керівник:**

доктор технічних наук, професор  
**Горбійчук Михайло Іванович**,  
Івано-Франківський національний технічний  
університет нафти і газу,  
завідувач кафедри комп'ютерних систем та мереж

**Офіційні опоненти:**

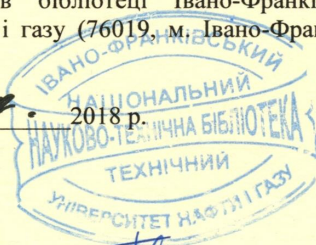
доктор технічних наук, професор  
**Мещеряков Леонід Іванович**,  
Національний технічний університет  
“Дніпровська політехніка”, професор кафедри  
програмного забезпечення комп'ютерних систем

кандидат технічних наук  
**Филипчук Леонід Вікторович**,  
Національний університет водного господарства  
та природокористування,  
доцент кафедри автоматизації, електротехнічних  
та комп'ютерно-інтегрованих технологій

Захист відбудеться «04» жовтня 2018 р. о 10<sup>00</sup> годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 20.052.03 Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу за адресою: 76019, м. Івано-Франківськ, вул. Карпатська, 15.

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

Автореферат розісланий «03» вересня 2018 р.



Вчений секретар  
спеціалізованої вченої ради Д 20.052.03,  
кандидат технічних наук, доцент

О. Б. Барна



an2728

1

## ГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

**Актуальність теми.** Сучасний розвиток технології подачі та оброблення інформації висуває до існуючих систем керування та контролю нові вимоги: впровадження сучасних методів ідентифікації та контролю параметрів основного обладнання компресорних станцій (КС), а також керування технологічним обладнанням із верхнього рівня – автоматизованого робочого місця (АРМ) системного інженера, що істотно вплине на надійність і безвідмовність роботи газотранспортної системи (ГТС) України. Інтеграція системи контролю параметрів двоступеневого нагнітача природного газу у склад системи автоматичного керування (САК) КС даватиме можливість оперативно відстежувати його технічний стан, що приведе до скорочення втрат природного газу під час його компримування.

Оскільки основні властивості відцентрових нагнітачів (ВЦН) пов'язані з геометричними параметрами їхньої проточної частини, питанню їхнього впливу на роботу ВЦН присвячена значна кількість публікацій Горбійчука М. І., Грудза Я. І., Семенцова Г. Н., Заміховського Л. М., Ковалка М. П., Ільченка Б. С., Ревзина Б. С., Козаченка А. Н., Скріпки О. А., Риса В. Ф., Галеркіна Ю. Б., Галиулліна З. Т., Парафейника В. П. та інших. Вони провели газодинамічний розрахунок параметрів проточної частини відцентрового нагнітача на основі експериментальних даних, розраховували коефіцієнти втрат і визначали вплив окремих факторів конструкції проточної частини ВЦН на політропний к.к.д. та форму його теплотехнічних характеристик. Проте побудовані ними математичні моделі призначені для відцентрових нагнітачів з одним ступенем стиснення газу. Оскільки більшість КС України використовують двоступеневі нагнітачі, то актуальною є побудова математичної моделі двоступеневого ВЦН природного газу і створення на цій основі алгоритмічного та програмного забезпечення підсистеми ідентифікації та контролю параметрів двоступеневого ВЦН з наступним інтегруванням його в систему САК КС.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.** Вибраний напрям досліджень є складовою частиною тематичного плану Іван-Франківського національного технічного університету нафти і газу (ІФНТУНГ). Дисертаційна робота виконана відповідно до напряму досліджень кафедри комп'ютерних систем і мереж ІФНТУНГ. Тематика роботи є частиною планової державної науково-дослідної програми з розвитку нафтогазового комплексу України і базується на результатах держбюджетної роботи «Синтез комп'ютерних систем та розроблення програмного забезпечення для об'єктів нафтогазового комплексу» (№ РК 0111U005890).

Автор був безпосереднім виконавцем з розроблення методів контролю параметрів складних технологічних об'єктів.

**Мета і завдання досліджень.** Метою даної роботи є підвищення ефективності роботи двоступеневого ВЦН шляхом розроблення й удосконалення методів контролю та ідентифікації його параметрів із застосуванням методів штучного інтелекту для оперативного відстежування технічного стану його проточної частини, що дозволить скоротити втрати газу під час його компримування.

an 2728

Досягнення поставленої мети вимагає вирішення таких взаємопов'язаних завдань:

- комплексний аналіз існуючих методів контролю параметрів ВЦН;
- розроблення математичної моделі двоступеневого ВЦН природного газу, що враховує втрати на витоки газу і тертя дисків;
- розроблення методу параметричної ідентифікації параметрів математичної моделі двоступеневого ВЦН;
- побудова емпіричної моделі двоступеневого ВЦН із використанням індуктивного методу самоорганізації моделей;
- синтез системи оцінювання технічного стану проточної частини двоступеневого нагнітача природного газу із використанням методів штучного інтелекту;
- розроблення прикладного програмного продукту підтримки задач контролю параметрів двоступеневого ВЦН із можливістю його інтегрування до існуючої САК КС.

*Об'єктом дослідження* є технологічний процес компримування природного газу двоступеневими нагнітачами природного газу.

*Предметом дослідження* є автоматизовані системи керування процесом компримування природного газу, в основі побудови яких лежать методи і алгоритми контролю та ідентифікації параметрів двоступеневих нагнітачів природного газу.

*Методи дослідження.* В основу виконаних досліджень покладено метод найменших квадратів (ідентифікація параметрів математичної моделі двоступеневого ВЦН); метод генетичних алгоритмів (мінімізація розв'язання цільової функції та вибір структури емпіричної моделі двоступеневого ВЦН); метод нечіткої логіки (синтез системи оцінювання технічного стану проточної частини двоступеневого ВЦН).

**Наукова новизна отриманих результатів** полягає у постановці та розв'язанні актуальної науково-технічної задачі контролю параметрів двоступеневого нагнітача природного газу під час його експлуатації; побудові математичної моделі двоступеневого ВЦН природного газу із врахуванням втрат через витоки газу і тертя дисків; синтезі емпіричної моделі оптимальної складності з використанням генетичних алгоритмів та паралельного алгоритму розв'язання системи лінійних алгебраїчних рівнянь із застосуванням методу Гаусса; синтезі системи оцінювання технічного стану проточної частини двоступеневого ВЦН і на цій основі розроблення спеціального програмного забезпечення для контролю параметрів нагнітача під час його експлуатації.

Загальний науковий результат – метод ідентифікації та контролю параметрів двоступеневого ВЦН природного газу на засадах штучного інтелекту.

Наукова новизна виконаної роботи визначається такими положеннями:

*вперше:*

- розроблено математичну модель двоступеневого нагнітача природного газу, що дозволяє отримати залежність продуктивності ВЦН від його технологічних та геометричних параметрів;

- розроблено метод параметричної ідентифікації параметрів математичної моделі двоступеневого ВЦН, який дає змогу розрахувати параметри технічного стану нагнітача, що відповідають умовам роботи нового нагнітача або після його капітального ремонту (КР);

- синтезовано систему оцінювання технічного стану проточної частини двоступеневого ВЦН природного газу із використанням основних понять та визначень нечіткої логіки, що підвищує ефективність прийняття відповідних рішень для оцінювання технічного стану проточної частини двоступеневого нагнітача;

*удосконалено:*

- метод побудови емпіричної моделі оптимальної складності з використанням генетичного підходу та паралельного алгоритму розв'язання системи лінійних алгебраїчних рівнянь із застосуванням методу Гаусса, що порівняно з індуктивним методом самоорганізації моделей скорочує затрати машинного часу на їхню реалізацію;

*знайшов подальший розвиток* метод синтезу системи контролю параметрів двоступеневого ВЦН природного газу, який дає змогу інтегрувати його в існуюче програмне забезпечення КС, що дозволить зменшити втрати газу в процесі експлуатації нагнітача та зменшити собівартість ремонтно-профілактичних робіт.

**Практичне значення отриманих результатів.** Наукові положення, висновки і рекомендації, сформульовані автором у дисертації, мають практичне значення і полягають у наступному:

- розроблено алгоритми і програмне забезпечення для розв'язання задачі ідентифікації та контролю параметрів двоступеневого ВЦН, що дозволяють аналізувати і відстежувати диспетчером технічний стан проточної частини двоступеневого ВЦН під час його експлуатації;

- розроблений програмний модуль системи ідентифікації технічного стану проточної частини ВЦН прийнято до впровадження в філії УМГ «ПРИКАРПАТТРАНСГАЗ» (акт від 12.06.2017 р.);

- розроблений програмний модуль системи ідентифікації технічного стану проточної частини ВЦН прийнято до впровадження в філії УМГ «КИЇВТРАНСГАЗ» ПАТ «УКРТРАНСГАЗ» (акт від 26.04.2017 р.);

- окремі розділи дисертаційної роботи використано у навчальному процесі для вивчення дисциплін «Комп'ютерні системи штучного інтелекту» та «Моделювання об'єктів нафтогазового комплексу» (акт про впровадження від 17.05.2017 р.).

**Особистий внесок здобувача.** Основні результати теоретичних і практичних досліджень, що є змістом дисертаційної роботи, автор одержав особисто. У наукових працях, виконаних у співавторстві, авторові належить: у роботі [1] – розроблено метод параметричної ідентифікації, що складається з двох етапів визначення параметрів технічного стану ВЦН. На першому етапі для нового ВЦН (або після його КР) визначають усі параметри, а на другому етапі – тільки ті параметри, зміна яких викликана експлуатаційними факторами; [2] – розроблено метод параметричної ідентифікації параметрів математичної моделі ВЦН

природного газу; [3, 4] – аналізовано метод побудови емпіричних моделей оптимальної складності на засадах генетичних алгоритмів оптимальної складності на паралелізм; [5] – розроблено математичну модель двоступеневого нагнітача природного газу на основі рівнянь матеріального та енергетичного балансів, що виражає залежність продуктивності нагнітача від його технологічних та геометричних параметрів; [6] – розроблено метод оцінювання технічного стану двоступеневого нагнітача природного газу на основі ідентифікації параметрів лінеаризованої моделі, що ґрунтується на системі нечіткого висновку типу Мамдані; [7] – розроблено метод синтезу емпіричних моделей з використанням генетичних алгоритмів. Для підвищення ефективності обчислювального процесу розроблено паралельний алгоритм; [8] – синтезована система контролю параметрів технічного стану двоступеневого нагнітача природного газу; [9] – синтезовано систему оцінювання технічного стану проточної частини двоступеневого ВЦН природного газу із використанням основних понять та визначень нечіткої логіки; [10] – запропоновано метод і алгоритм оцінки технічного стану відцентрового нагнітача природного газу; [11] – розроблено емпіричну модель відцентрового нагнітача природного газу із використанням індуктивного методу самоорганізації моделей; [12] – для зменшення часу обчислень запропоновано розпаралелити алгоритм синтезу моделей оптимальної складності; [13] – розроблено паралельні алгоритми та визначено їхні характеристики – прискорення і ефективність; [14] – для виявлення ефективності паралельних алгоритмів синтезу моделей оптимальної складності обчислено кількість арифметичних операцій при реалізації паралельних алгоритмів.

**Апробація результатів дисертації.** Основні результати дисертаційної роботи доповідалися, обговорювалися і дістали позитивну оцінку на міжнародних та всеукраїнських конференціях: XX Міжнародній конференції з автоматичного управління "Автоматика 2013" (Миколаїв, 2013 р.); Всеукраїнській науково-практичній конференції «Інформаційні технології в освіті, техніці та промисловості» (Івано-Франківськ, 2013 р.); Міжнародній науково-координаційній нараді «Інформаційні проблеми комп'ютерних систем, юриспруденції, енергетики, економіки, моделювання та управління» (Тернопіль, 2014); XXI Міжнародній конференції з автоматичного управління "Автоматика 2014" (Київ, 2014 р.); the LXXXVIII International Research and Practice Conference «Creation as the factor of evolutionary development and the society's aspiration to perfection» (London, 2014).

**Публікації.** Основні результати дисертації викладено у 14 наукових працях: 3 публікації у виданнях, включених до наукометричних баз, таких як Index Copernicus, Scopus та Socrates Impulse, що підтверджено сертифікатом № DS-014/0130; 7 статей у наукових фахових виданнях; 5 публікацій у збірниках доповідей міжнародних та всеукраїнських науково-практичних конференціях.

**Структура та обсяг дисертації.** Дисертація складається із вступу, чотирьох розділів основної частини, висновків, списку використаних джерел, додатків. Загальний обсяг друкованого тексту становить 211 сторінок, із них: 139 сторінок основного тексту, 39 рисунків, 13 таблиць, список використаних джерел містить 133 найменування на 13 сторінках, та 10 додатків на 55 сторінках.

## ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У *вступі* розкрито стан наукової проблеми та її значущість, обґрунтовано актуальність теми дисертаційної роботи, показано зв'язок вибраного напряму досліджень з науковими програмами, планами, темами, сформульовано мету та визначено основні завдання дослідження, наведено наукову новизну і практичне значення отриманих результатів для контролю параметрів двоступеневого ВЦН природного газу, показано особистий внесок здобувача, подано відомості про апробацію та впровадження результатів роботи.

У *першому розділі* зроблений аналіз літературних джерел та розглянуто відцентровий нагнітач як об'єкт автоматичного керування. Здійснено аналіз впливу основних геометричних параметрів ВЦН на процес компримування газу. Розглянуті сучасні методи контролю та ідентифікації параметрів нагнітачів, а також їхні математичні моделі.

Проведений аналіз показав, що існуючі математичні моделі, в основному, призначені для одноступневих нагнітачів. Оскільки більша частина нагнітачів, які постачає промисловість в останні роки, мають два ступені стиснення газу, то постає завдання розроблення методу контролю параметрів двоступеневого ВЦН, який разом із відповідною математичною моделлю дозволить контролювати технічний стан його проточної частини.

Виконаний аналіз дозволив обґрунтувати вибір напряму дослідження, сформулювати мету і завдання дисертаційної роботи.

*Другий розділ* дисертаційної роботи присвячено теоретичним засадам методів ідентифікації та контролю параметрів двоступеневого ВЦН.

На нові рівняння матеріального та енергетичного балансів розроблено математичну модель для двоступеневого ВЦН, що виражає залежність продуктивності нагнітача природного газу від його технологічних та геометричних параметрів із врахуванням втрат через витoki газу і тертя дисків:

$$Q_1 = \omega \left( -0,5 \frac{\alpha_1}{\alpha_0} + \sqrt{\frac{1}{4} \left( \frac{\alpha_1}{\alpha_0} \right)^2 + \frac{\alpha_2}{\alpha_0}} \right), \quad (1)$$

де  $\alpha_0 = \frac{X_1}{k_{v1}} + \frac{X_2}{k_v}$ ;  $\alpha_1 = \left( \frac{\varepsilon}{k_v} - 1 \right) \frac{A}{n_{II}^2} - X_0 + 0,5(1 + k_v + 2k_{v1}) \left( \frac{X_1}{k_{v1}} + \frac{X_2}{k_v} \right) K_{np}$ ;  $k_{v1} = \frac{\rho_2}{\rho_1} -$

поправка на стиснення газу першої ступені ВЦН;  $k_v = k_{v2} = \frac{\rho_3}{\rho_1}$  – поправка на

стиснення газу другої ступені ВЦН;  $\rho_i$ ,  $i=1, 3$  – густина газу, індекс «1» належить до умов входу газу у першу ступінь ВЦН, а індекс «3» – до умов виходу газу із другої

ступені ВЦН;  $\varepsilon$  – ступінь підвищення тиску газу ВЦН;  $A = \frac{A_0}{\omega_{II}^2}$ ;  $n_{II}$  – зведена частота

обертання робочого колеса;  $A_0 = z_0 R_0 T_0$  – параметри зведення;  $\omega$  – кутова швидкість ротора нагнітача;  $\omega_{II}$  – номінальна кутова швидкість ротора нагнітача;

$\alpha_2 = 0,5(1 + k_v + 2k_{v1})X_0K_{np} + K_T(k_{v1} + k_v)$ ;  $k_T$  – коефіцієнт, значення якого залежить

від технології обробки лопаток колеса нагнітача;  $K_{np} = 0,5\alpha_1\pi s D_s \sqrt{\frac{3}{Z_s}(R_2^2 - R_1^2)}$ ;  $\alpha$  – коефіцієнт витрати, який залежить від конструкції ущільнення;  $s$  – радіальний зазор;  $D_s$  – діаметр ущільнення;  $Z_s$  – кількість ущільнень;  $R_1, R_2$  – внутрішній та зовнішній радіуси робочих коліс (РК) нагнітача;  $X_0 = \mu(2R_2^2 - R_1^2)$ ;

$$X_1 = \mu \left( \frac{R_2 \operatorname{ctg} \beta_2}{F_2^{(1)}} - \frac{R_1 \operatorname{ctg} \beta_1}{F_1^{(2)}} \right); \quad X_2 = \frac{\mu R_2 \operatorname{ctg} \beta_2}{F_2^{(2)}}; \quad X_3 = K_{np}; \quad X_4 = K_T = k_T \frac{D_2^5}{8};$$

$\mu = 1 / \left( 1 + \frac{a+1,2 \sin \beta_2}{z_s(1-\lambda^2)} \right)$  – коефіцієнт корегування кінцевої остаточної кількості

лопаток;  $a = 1,2$  – дослідний коефіцієнт;  $\lambda = \frac{D_1}{D_2}$ ;  $\beta_1, \beta_2$  – вхідний і вихідний

лопатеві кути робочих коліс;  $F_2^{(1)} = \pi D_2 b_2^{(1)} \tau$  – площа поперечного перерізу виходу газу із першої ступені ВЦН;  $F_1^{(2)} = \pi D_1 b_1^{(2)}$  – площа поперечного перерізу входу газу в другу ступінь ВЦН;  $F_2^{(2)} = \pi D_2 b_2^{(2)} \tau$  – площа поперечного перерізу виходу газу із другої ступені ВЦН;  $D_1, D_2$  – внутрішній та зовнішній діаметри робочих коліс нагнітача;  $b_1^{(2)}, b_2^{(2)}$  – вхідна та вихідна ширина лопаток другого РК ВЦН;  $b_2^{(1)}$  –

вихідна ширина лопатки першого РК ВЦН;  $\tau = 1 - \frac{z_s \cdot \delta_m}{\pi \cdot D_2 \cdot \sin \beta_2}$  – коефіцієнт зменшення площі за допомогою лопаток РК;  $z_s$  – кількість лопаток;  $\delta_m$  – середня товщина лопаток кожного із двох коліс.

Величини  $X_1, X_2$  і  $X_3$  визначаються через радіальний зазор  $s$ , середню товщину і ширину лопаток  $\delta_m$  і  $b_i^{(j)}$ , тобто  $X_i = X_i(b_i^{(j)}, \delta_m)$ ,  $i=1, 2, j=1, 2$ ,  $X_3 = K_{np}(s)$ . З огляду на те, що параметри  $X_1, X_2$  і  $X_3$  через рівняння (1) пов'язані з технологічними параметрами роботи нагнітача, їх розглянуто як параметри технічного стану двоступеневого ВЦН природного газу.

Оскільки поява будь-якого дефекту в проточній частині ВЦН викликає зміну його геометричних та технологічних параметрів, то, оцінюючи технічний стан його проточної частини, важливо знати не абсолютні значення  $X_1, X_2$  та  $X_3$ , а їхнє відхилення від їхніх початкових значень, які визначені для нового ВЦН або після його КР. Для їхнього оцінювання побудовано лінеаризовану математичну модель двоступеневого відцентрового нагнітача природного газу:

$$\Delta Q = \sum_{i=1}^n \frac{\partial \varphi(\bar{X})}{\partial X_i} \Delta X_i, \quad n=3, \quad (2)$$



де  $\Delta Q = Q_{count}^{(0)} - Q$ ;  $\varphi(\bar{X}) = Q_i$ ;  $Q_{count}^{(0)}$  – перераховане значення об'ємної продуктивності нового (або після КР) нагнітача до поточних умов;  $Q$  – поточне значення об'ємної продуктивності нагнітача;  $\Delta X_i = X_i^{(0)} - X_i$ ;  $X_i^{(0)}$  – значення параметрів технічного стану двоступеневого ВЦН, які відповідають  $Q_{count}^{(0)}$ .

Значення часткових похідних, що входять до лінеаризованої моделі (2) будуть такими:

$$\frac{\partial \varphi(\bar{X})}{\partial X_1} = \frac{\omega}{2r\alpha_0 k_{v1}} \left( \left( \frac{r_1}{2} - r \right) \left( \frac{X_3}{2} (1 + k_v + 2k_{v1}) - r_1 \right) - r_2 \right), \quad (3)$$

$$\frac{\partial \varphi(\bar{X})}{\partial X_2} = \frac{\omega}{2r\alpha_0 k_v} \left( \left( \frac{r_1}{2} - r \right) \left( \frac{X_3}{2} (1 + k_v + 2k_{v1}) - r_1 \right) - r_2 \right), \quad (4)$$

$$\frac{\partial \varphi(\bar{X})}{\partial X_3} = \frac{\omega(1 + k_v + 2k_{v1})}{4r\alpha_0} \left( \left( \frac{r_1}{2} - r \right) \left( \frac{X_1}{k_{v1}} + \frac{X_2}{k_v} \right) + X_0 \right), \quad (5)$$

$$\text{де } r_1 = \frac{\alpha_1}{\alpha_0}; \quad r_2 = \frac{\alpha_2}{\alpha_0}; \quad r = \sqrt{\left( \frac{r_1}{2} \right)^2} + r_2.$$

Для обчислення часткових похідних  $\frac{\partial \varphi(\bar{X}^{(0)})}{\partial X_i} = \frac{\partial \varphi(\bar{X})}{\partial X_i} \Big|_{\bar{X}=\bar{X}^{(0)}}$ ,  $i=1, 2, 3$

необхідно знати значення  $X_i^{(0)}$   $i = \overline{0,4}$ ,  $\mu$  та  $k_7$  математичної моделі (1). Для їхньої ідентифікації запропоновано застосовувати метод найменших квадратів (МНК), а для мінімізації розв'язання цільової функції – генетичний алгоритм.

Для усунення фактора залежності продуктивності нагнітача від його технологічних параметрів і виявлення зміни продуктивності нагнітача від параметрів технічного стану двоступеневого ВЦН побудовано емпіричну модель нагнітача з використанням індуктивного методу самоорганізації моделей:

$$y_i = \sum_{i=0}^M a_i \prod_{j=1}^n x_j^{s_{ji}}, \quad (6)$$

де  $n$  – кількість вхідних аргументів;  $M$  – кількість членів полінома;  $a_i$  – коефіцієнти полінома;  $x_j$  – вхідні змінні;  $y_i$  – вихідні змінні;  $s_{ji}$  – степені аргументів;  $\sum_{j=1}^n s_{ji} \leq m$ , де  $m$  – степінь полінома (6).

Змінні, що входять до емпіричної моделі (6) приведені до безрозмірного вигляду:

$$z_j^{(i)} = \frac{Z_j^{(i)} - Z_{j,min}^{(i)}}{Z_{j,max}^{(i)} - Z_{j,min}^{(i)}}, \quad i = \overline{1,n}, \quad y_i = \frac{Q_i - Q_{min}}{Q_{max} - Q_{min}}, \quad (7)$$

де  $Z_1 = P_1$ ;  $Z_2 = P_3$ ;  $Z_3 = T_1$ ;  $Z_4 = T_3$ ;  $Z_5 = \omega$ ;  $Z_6 = P_a$ ;  $Q_{min} = \min_{i \in N} \{Q_i\}$ ;  $Q_{max} = \max_{i \in N} \{Q_i\}$ ;  $P_1, P_3$  – відповідно тиск газу на вході і на виході нагнітача;  $T_1, T_3$  –

відповідно температура газу на вході і на виході нагнітача;  $\omega$  – кутова швидкість ротора нагнітача;  $P_a$  – атмосферний тиск.

Для визначення оптимальної структури емпіричної моделі (6) вибраний критерій регулярності

$$\Delta^2(B) = \frac{\sum_{i=1}^{N_B} (Y^{(i)}(B) - y^{(i)}(B))^2}{\sum_{i=1}^{N_B} Y^{(i)}(B)^2} \quad (8)$$

або критерій зміщення

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

де  $y^{(i)}(A)$  та  $y^{(i)}(B)$  – значення виходу моделі, обчислені відповідно на множинах експериментальних значень навчальної  $N_A$  та перевіркої  $N_B$  послідовностей. Для організації перебору моделей-претендентів застосовано генетичний підхід, що дає змогу вирішити проблему великої розмірності.

Емпірична модель двоступеневого нагнітача дає змогу перерахувати значення об'ємної продуктивності нового нагнітача (або після КР) до поточних умов за формулою:

$$y_{count}^{(0)} = F \bar{a}, \quad (10)$$

де  $F$  – матриця, яка утворена з функцій  $f_i(\bar{x}) = \prod_{j=1}^n (x_j)^{s_{ij}}$ , де  $\bar{a}$  – параметри емпіричної моделі (6) включно з нульовими їхніми значеннями. Перехід від безрозмірних одиниць до розмірних здійснено відповідно до формули:

$$Q_{count, i}^{(0)} = y_{count, i}^{(0)} (Q_{max}^{(0)} - Q_{min}^{(0)}) + Q_{min}^{(0)}, \quad (11)$$

де  $Q_{min}^{(0)}$  – мінімальна продуктивність нового нагнітача (або після КР),  $Q_{max}^{(0)}$  – максимальна продуктивність нового нагнітача (або після КР). За значеннями  $Q_{count, i}^{(0)}$  та параметрів  $X_i^{(0)}$ ,  $i = \overline{0, 4}$  знаходимо величини лінеаризованої моделі (2) за формулами (3)-(5):  $\beta_i = \frac{\partial \varphi(\bar{X}^{(0)})}{\partial X_i}$ ,  $i = 1, 2, 3$ .

Аналіз залежностей (2) та (3) – (5) показує, що  $\beta_i^{(k)} = \beta_i(\bar{X}, \bar{u}^{(k)})$ , де  $\bar{u}^{(k)} = (\varepsilon^{(k)}, z^{(k)}, \tau^{(k)}, T_1^{(k)}, z_1^{(k)}, \omega^{(k)})^T$ . З урахуванням прийнятих позначень залежність (2) набуде такого вигляду:

$$\Delta Q^{(k)} = \beta_1(\bar{X}, \bar{u}^{(k)}) \Delta X_1 + \beta_2(\bar{X}, \bar{u}^{(k)}) \Delta X_2 + \beta_3(\bar{X}, \bar{u}^{(k)}) \Delta X_3. \quad (12)$$

Для знаходження зміни параметрів технічного стану  $\Delta X_i$ ,  $i=1, 2, 3$  за значеннями  $\Delta Q_k^{(count)} = Q_{count,k}^{(0)} - Q_k$  та  $\Delta Q^{(k)}$  мінімізується критерій апроксимації

$$J(\Delta \bar{X}) = \sum_{k=1}^N \left( \Delta Q_k^{(count)} - \Delta Q(\bar{X}, \bar{u}^{(k)}, \Delta \bar{X}) \right)^2. \quad (13)$$

Мінімізація виразу (13) щодо значень  $\Delta X_i$ ,  $i=1, 2, 3$  приводить до такого результату:

$$\Delta \bar{X} = CF^T \Delta \bar{Q}^{(count)}, \quad (14)$$

$$\text{де } F = \begin{bmatrix} \beta_1(\bar{X}, \bar{u}^{(1)}) & \beta_2(\bar{X}, \bar{u}^{(1)}) & \beta_3(\bar{X}, \bar{u}^{(1)}) \\ \beta_1(\bar{X}, \bar{u}^{(2)}) & \beta_2(\bar{X}, \bar{u}^{(2)}) & \beta_3(\bar{X}, \bar{u}^{(2)}) \\ \dots & \dots & \dots \\ \beta_1(\bar{X}, \bar{u}^{(N)}) & \beta_2(\bar{X}, \bar{u}^{(N)}) & \beta_3(\bar{X}, \bar{u}^{(N)}) \end{bmatrix}, \quad C = (F^T F)^{-1},$$

$$\Delta \bar{Q}^{(count)} = \left( \Delta Q_1^{(count)}, \Delta Q_2^{(count)}, \dots, \Delta Q_N^{(count)} \right)^T.$$

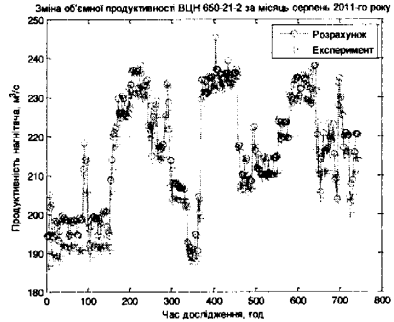
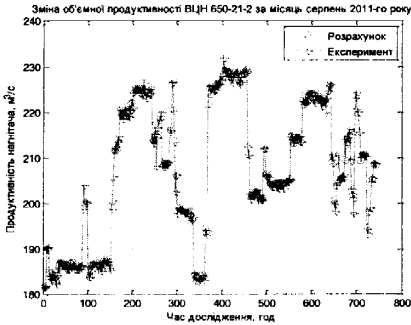
Інформація, на основі якої приймається рішення про поточний стан проточної частини ВЦН, є нечіткою, оскільки процеси, що проходять у проточній частині нагнітача, є суттєво нелінійними стохастично-хаотичними, які виникають в умовах апіорної та поточної невизначеності під впливом недосяжних для вимірювання збурень. Тому значення  $\Delta x_i = \frac{|\Delta X_i|}{X_i} \cdot 100\%$ ,  $i=1, 2, 3$  трактуються як нечіткі величини,

за якими можна оцінити технічний стан проточної частини двоступеневого ВЦН.

У *третьому розділі* наведено умови, методи та технічні засоби контролю параметрів нагнітачів на КС-39 «Прогрес». Експериментально перевірено розроблений метод контролю параметрів двоступеневого ВЦН 650-21-2 на КС-39 «Прогрес» та здійснено експертну оцінку технічного стану його проточної частини. Експлуатаційні характеристики роботи агрегату фіксували на протязі місяця до КР і на протязі місяця після нього. Програма досліджень передбачала отримання таких даних для побудови математичної моделі двоступеневого ВЦН природного газу: об'ємна продуктивність нагнітача  $Q_{ви}$ , перепад тиску на вхідному конфузори ВЦН  $\Delta P$ , тиск газу на вході  $P_{вх}$  і виході  $P_{вих}$  ВЦН, температура газу на вході  $T_{вх}$  і виході  $T_{вих}$  ВЦН, атмосферний тиск  $P_a$ , частота обертання ротора нагнітача  $n$ , густина природного газу  $\rho_2$ .

Ідентифікацію параметрів технічного стану ВЦН-650-21-2  $X_i^{(0)}$  та параметрів  $\mu$  та  $k_T$  математичної моделі (1) здійснено із використанням генетичних алгоритмів та оптимізаційного методу Нелдера-Міда. Результати досліджень показали (рис. 2), що використання генетичних алгоритмів (коефіцієнт кореляції  $K_{yy} = 0,9996$ , а середньоквадратичне відхилення  $\sigma_{yy} = 0,4390 \text{ м}^3/\text{с}$ ) для ідентифікації параметрів математичної моделі двоступеневого нагнітача природного газу порівняно з

оптимізаційним методом Нелдера-Міда ( $K_{\text{н}} = 0,9893, \sigma_{\text{н}} = 4,2614 \text{ м}^3/\text{с}$ ) забезпечує кращу збіжність експериментальних значень до розрахункових.



а) генетичні алгоритми

б) метод Нелдера-Міда

Рис. 2. Графічні результати методів параметричної ідентифікації параметрів двоступеневого нагнітача природного газу

У результаті ідентифікації основних параметрів математичної моделі (1) із використанням генетичних алгоритмів отримали:  $\mu = 0,7569$ ,  $k_T = 1,8$ ,  $X_0^{(0)} = 37,7751$ ;  $X_1^{(0)} = 18,1741$ ;  $X_2^{(0)} = 26,4650$ ;  $X_3^{(0)} = 0,5801$ ;  $X_4^{(0)} = 33,0599$ .

Для знаходження значень поточної об'ємної продуктивності  $Q_i^{(count)}$ , що перерахована до умов нового нагнітача (або після КР), побудовано емпіричну модель нагнітача у вигляді полінома (6). Для її реалізації розроблено алгоритм оптимальної складності, що реалізується у два етапи:

1. *Генерування часткових моделей різної складності.* Експериментальні дані, що входять до емпіричної моделі (6), приводять до безрозмірного вигляду за формулами (7). Отримані матриці вхідних  $x_j^{(i)}$  та вихідних даних  $y_i$  діляться на дві множини: навчальну  $N_A$  та перевірну  $N_B$  відповідно для вибраного критерію селекції (8) або (9). Формування структур часткових моделей реалізується за принципом роботи двійкового лічильника, до останнього ряду якого додається одиниця.

2. *Синтезування моделей оптимальної складності на засадах генетичних алгоритмів.* Синтезування моделей оптимальної складності ґрунтується на основних засадах генетичних алгоритмів. У випадку, коли як функцію пристосування використано критерій (8), то отримали матриці  $F_A$  і  $F_B$ . Якщо на  $i$ -тій позиції хромосоми знаходиться нуль, то у результаті вилучення  $c$  стовпців із матриці  $F_A$  отримали матрицю  $\tilde{F}_A$  розміром  $N_A \times (M - c)$ . Аналогічно отримали матрицю  $\tilde{F}_B$  розміром  $N_B \times (M - c)$ . На множині точок  $N_A$  обчислено ненульові коефіцієнти  $\alpha_{\lambda j}$ ,  $j = \overline{1, M - c}$  моделі (6) шляхом розв'язання рівняння Гаусса

$$\tilde{M}_{F,A} \bar{a}_A = \tilde{F}_A^T \bar{Y}_A, \quad (15)$$

де  $\bar{a}_A = (a_{A0}, a_{A1}, \dots, a_{A, M-c-1})^T$  – вектор ненульових параметрів моделі, який асоційований з черговою хромосомою;  $\tilde{M}_{F,A} = \tilde{F}_A^T \tilde{F}_A$ ,  $\bar{Y}_A = (Y^{(1)}, Y^{(2)}, \dots, Y^{(N_A)})$  – вектор експериментальних значень на множині  $N_A$ . Рівняння (15) записують у такій формі:

$$\tilde{A} \bar{a}_A = \tilde{b}, \quad (16)$$

де  $\tilde{A} = \tilde{M}_{F,A}$ ;  $\tilde{b} = \tilde{F}_A^T \bar{Y}_A$ . Систему (16) приводять до верхньої діагональної форми:

$$\tilde{a}_{i1}^{(i)} = \frac{\tilde{a}_{i1}^{(i-1)}}{\tilde{a}_{ii}^{(i-1)}}, \quad i = 1, M-c; \quad \tilde{a}_{k'}^{(i)} = \tilde{a}_{k'}^{(i-1)} - \tilde{a}_{k'}^{(i)} \tilde{a}_{ij}^{(i-1)}, \quad k = i+1, M-c, \quad j = \overline{1, M-c+1}, \quad (17)$$

де  $\tilde{a}_i^{(i)}$ ,  $\tilde{a}_{k'}^{(i)}$  –  $i$ -тий та  $k$ -тий рядок розширеної матриці, утвореної шляхом приєднання до матриці  $\tilde{A}$  вектор-стовпця  $\tilde{b}$ ;  $\tilde{a}_{i1}^{(0)} = \tilde{a}_{i1}$ ;  $\tilde{a}_{k'}^{(0)} = \tilde{a}_{k'}$ .

Оскільки значна частина машинного часу витрачається на розв'язування системи лінійних алгебраїчних рівнянь (15), то запропоновано паралельний алгоритм розв'язку системи рівнянь (15). Суть такого алгоритму у наступному. На початковій стадії вся матриця  $\tilde{A}$  знаходиться у робочому просторі першого процесу – майстра. Перший крок – майстер відправляє, по можливості, рівні шари матриці  $\tilde{A}$  іншим робітникам так, що кожний із робітників отримує підматриці  $\tilde{A}_i^{(1)}$ ,  $i = \overline{0, q-1}$ , де  $q$  – загальна кількість робітників. Після відправки майстер нормує перший рядок своєї підматриці  $\tilde{A}_0^{(1)}$  за формулами (17) і тут же відсилає значення  $\tilde{a}_{i1}^{(1)}$  іншим робітникам. Робітники, отримавши рядок  $\tilde{a}_i^{(1)}$ , перераховують елементи своїх підматриць, включаючи і елемент  $\tilde{a}_{q, M-c+1}$ . Одночасно майстер обчислює нові значення елементів за формулами (17), починаючи з другого рядка. У результаті такого перерахунку робітники отримують підматриці  $\tilde{A}_i^{(1)}$ ,  $i = \overline{1, q-1}$ , у яких нульовими будуть перші стовпці. У матриці  $\tilde{A}_1^{(0)}$  перший стовпець буде мати нульові елементи, крім першого  $\tilde{a}_{11}^{(1)}$ , який дорівнюватиме одиниці. Другий крок – майстер нормує другий рядок своєї підматриці і значення  $\tilde{a}_2^{(2)}$  посилає всім робітникам, які модифікують свої підматриці. Причому майстер змінює індекс  $k$  від 3 до  $M-c$ , а робітники відповідно від 2 до  $M-c$ . У підсумку довжина другого рядка з нульовими елементами скоротилася на одиницю. Підматриці, які розміщені у робочих просторах робітників, вміщуватимуть по два нульових стовпці. Процес модифікації елементів підматриць здійснюється до тих пір поки майстер не завершить приводити матрицю до верхнього діагонального вигляду. У підсумку у робочому просторі майстра буде зберігатись верхня прямокутна матриця з одиницями на головній діагоналі, а у робочих просторах робітників отримаємо підматриці, кількість нульових стовпців яких визначається кількістю рядків матриці майстра. Наступні цикли відбуваються за аналогічною схемою. Алгоритм продовжує працювати до тих пір поки розмір чергового шару не перевищуватиме кількості робітників. Тоді майстер приводить підматрицю, що залишилась, до верхньої прямокутної матриці з одиницями на головній діагоналі.

Завершальний етап – це об'єднання всіх матриць, які були збережені у робочому просторі майстра.

Результати синтезу емпіричної моделі (6) та її перевірки на адекватність відтворює рис. 3. Було отримано:  $K_{yy} = 0,9977$  та  $\sigma_{yy} = 0,0478$  м<sup>3</sup>/с.

Після перерахунку значень об'ємної продуктивності  $Q_j^{(0)}$  за формулою (10) знайдено значення об'ємної продуктивності за місяць до КР в розмірних одиницях за формулою (11). Графік зміни об'ємної продуктивності ВЦН 650-21-2 за місяць березень 2011 року показаний на рис. 4.

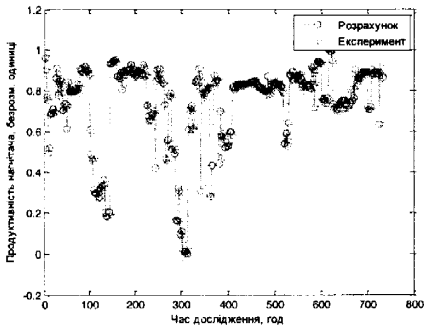


Рис. 3. Результати синтезу емпіричної моделі та її перевірки на адекватність

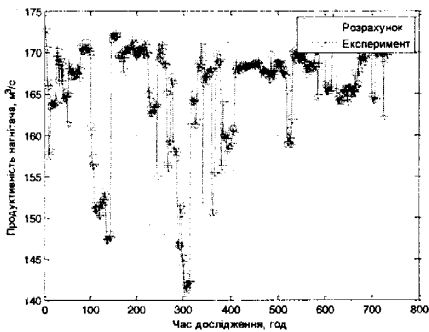
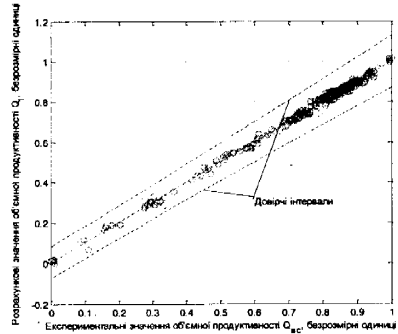


Рис. 4. Зміна об'ємної продуктивності ВЦН 650-21-2 за місяць березень 2011 року

Використовуючи основні поняття та визначення нечіткої логіки (Fuzzy Logic), синтезовано структуру системи оцінювання технічного стану проточної частини двоступеневого ВЦН (рис. 5), що складається з окремих модулів. Функції належності вхідних нечітких величин та вихідної нечіткої змінної показані на рис. 6.

Обробка вхідної інформації складається з таких основних етапів: *фазифікації* (знаходження значень і форми функцій належностей лінгвістичних змінних за відомими вхідними даними  $\Delta x_i$ , та визначення кількості значень вибраних термів),

*інференціювання* (логічна обробка нечітких даних, що надходять як від фазифікації, так і від бази правил, що формуються на основі експертних знань і дають змогу встановити функціональну залежність між вихідним параметром  $d$  та вектор-аргументом  $\bar{x}$ ,  $\bar{x} = (\Delta x_1, \Delta x_2, \Delta x_3)^T$ ) та *дефазифікації* (перетворення лінгвістичних змінних виходу у вихідний сигнал).

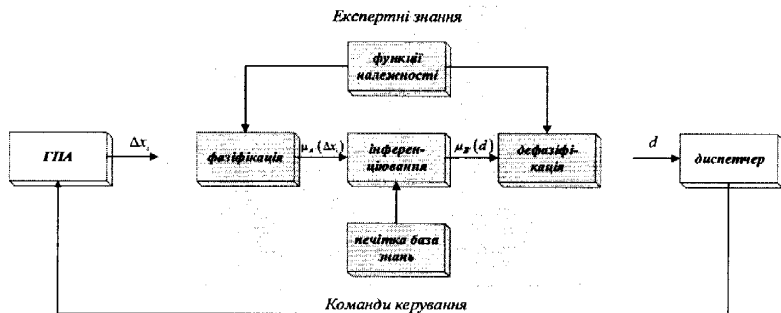
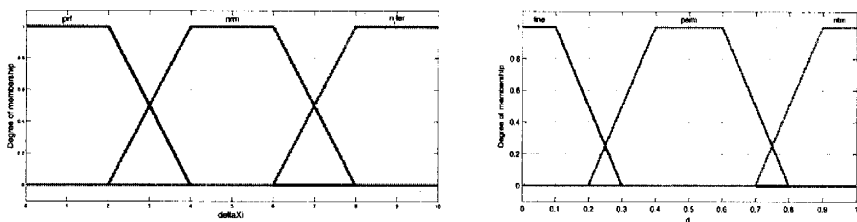


Рис. 5. Структура системи оцінювання технічного стану проточної частини двоступеневого ВЦН природного газу



а) функції належності  $\mu_{A_i}(\Delta x_i)$  вхідних нечітких величин

б) функції належності  $\mu_{B_m}(d)$  для термів нечіткої змінної  $d$

Рис. 6. Функції належності вхідних нечітких величин та вихідної нечіткої змінної

Експериментальну перевірку синтезованої системи виконано за місяць до КР ВЦН 650-21-2 на КС-39 «Прогрес» під час якої, на основі розробленої бази правил та логічної обробки нечітких даних, зроблено висновок, що технічний стан проточної частини нагнітача – допустимий (дефазифікація вихідної лінгвістичної змінної  $\bar{d}$  методом центра ваги приводить до значення 0,5). Даний результат співпадає із реальним станом ВЦН, оскільки прямі виміри при розкритті його проточної частини дали середнє значення радіального зазору  $s_r = 0,8$  мм (за номінальної величини зазору  $s_r = 0,5$  мм), що свідчить про незначне погіршення технічного стану проточної частини ВЦН 650-21-2. Можливість використання синтезованої системи оцінювання технічного стану проточної частини двоступеневого ВЦН під час його експлуатації підтверджена експериментально на основі експлуатаційних характеристик ВЦН-650-21-2 протягом лютого 2016 року.

У *четвертому розділі* вибрано апаратні та програмні засоби для реалізації комп'ютерної системи контролю параметрів двоступеневого ВЦН та розроблено відповідне спеціальне програмне забезпечення. Запропоновано структуру системи контролю параметрів двоступеневого ВЦН, що розгорнута у вигляді АРМ на базі серійних персональних електронних обчислювальних машин (ПЕОМ) і входить до складу

інтегрованої системи керування Богородчанським лінійним виробничим управлінням магістральними газопроводами (ЛВУМГ) та має чотирирівневу ієрархічну структуру (рис. 7).

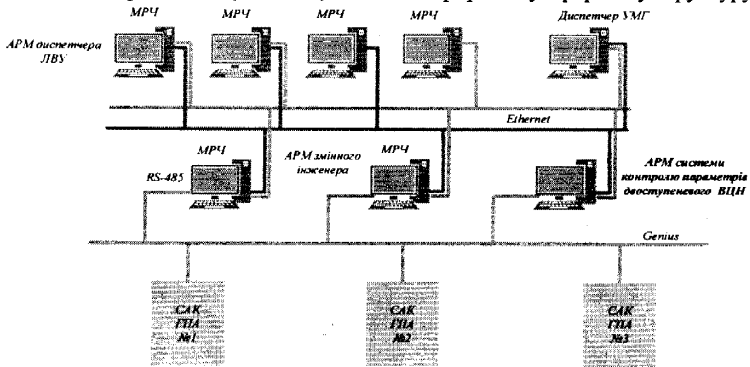


Рис. 7. Структура комп'ютерної системи контролю параметрів двоступеневого ВЦН в умовах Богородчанського ЛВУМГ

Для реалізації методу контролю параметрів двоступеневого ВЦН розроблений прикладний програмний продукт підтримки задачі контролю параметрів двоступеневого ВЦН у вигляді прикладного програмного модуля, в який інтегрована низка програмних продуктів, розроблених у середовищах MatLab та Delphi і який дає можливість інтегрувати його в існуюче програмне забезпечення. На рис. 8 зображена взаємодія блоків програм контролю параметрів двоступеневого ВЦН.

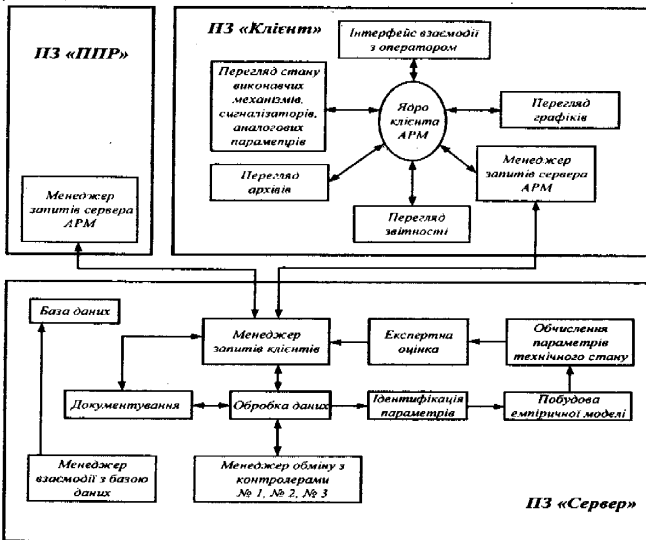


Рис. 8. Взаємодія блоків програм контролю параметрів двоступеневого ВЦН



## ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі на основі аналізу літературних джерел та проведених досліджень вирішено важливу науково-технічну задачу в галузі автоматизації процесів керування, що полягає у розробленні методів контролю та ідентифікації параметрів двоступеневого ВЦН і їхньої реалізації із використанням програмного забезпечення автоматизованої системи керування КС. Основні наукові та практичні результати полягають у такому:

1. На основі проведеного аналізу літературних джерел встановлено, що для зменшення собівартості проведення планово-попереджувальних ремонтів та підвищення ефективності роботи нагнітачів необхідно розробити та інтегрувати до складу існуючої САК КС систему оцінювання технічного стану проточної частини двоступеневого ВЦН, яка разом із відповідною математичною моделлю ВЦН забезпечить контроль його параметрів в умовах експлуатації, що, в свою чергу, дозволить простежити за появою і розвитком відмов.

2. Аналіз існуючих математичних моделей ВЦН показує, що розроблені моделі ВЦН, в основному, призначені для одноступеневих нагнітачів. Оскільки більшість КС України використовують двоступеневі нагнітачі природного газу, то в роботі розроблено математичну модель двоступеневого відцентрового нагнітача природного газу (1), особливістю якої є те, що вона враховує втрати на витоки газу і тертя дисків та виражає залежність продуктивності нагнітача від його технологічних та геометричних параметрів.

3. Розроблено метод параметричної ідентифікації параметрів математичної моделі двоступеневого нагнітача природного газу, який дає змогу розрахувати параметри технічного стану двоступеневого ВЦН, що відповідають умовам роботи нового нагнітача або після його КР. Перевагою цього методу є те, що для розв'язання задачі МНК використано генетичний алгоритм, що, в свою чергу, зменшує затрати часу на обчислення та виключає можливість потрапляння розв'язку задачі МНК в локальні екстремуми.

4. Для компенсації фактора залежності продуктивності нагнітача від зміни технологічних параметрів і виявлення зміни його продуктивності від параметрів технічного стану побудовано емпіричну модель ВЦН (6) із використанням індуктивного методу самоорганізації моделей. Вибір структури моделі здійснено на принципах генетичних алгоритмів, а для розв'язання системи лінійних алгебраїчних рівнянь застосовано паралельний алгоритм із використанням методу Гаусса, що скорочує затрати машинного часу на їхню реалізацію.

5. Синтезовано систему оцінювання технічного стану проточної частини двоступеневого ВЦН, що ґрунтується на визначенні відносних значень зміни параметрів технічного стану ВЦН, виражених у відсотках. На основі синтезованих бази правил та логічної обробки нечітких даних зроблено висновок, що технічний стан проточної частини ВЦН 650-21-2 до його КР на КС «Богородчани» – допустимий. Даний результат збігається із реальним станом нагнітача, оскільки прямі вимірювання при розкритті проточної частини ВЦН дали середнє значення

радіального зазору  $s_r = 0,8$  мм (за номінальної величини зазору  $s_r = 0,5$  мм), що свідчить про незначне погіршення технічного стану проточної частини ВЦН 650-21-2. Можливість використання синтезованої системи оцінювання технічного стану проточної частини двоступеневого ВЦН під час його експлуатації підтверджена експериментально на основі експлуатаційних характеристик ВЦН-650-21-2 протягом лютого 2016 року.

6. Розроблено прикладний програмний продукт підтримки задачі контролю параметрів двоступеневого ВЦН природного газу, що написаний об'єктно-орієнтованою мовою Delphi, із можливістю його інтегрування в існуюче програмне забезпечення SCADA-системи Citect верхнього рівня керування Богородчанським ЛВУМГ.

## СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

*Праці, в яких опубліковані основні наукові результати дисертації:*

1. Горбійчук М. І., Медведчук В. М., Кропельницька. Г. П. Метод параметричної ідентифікації технічного стану відцентрового нагнітача природного газу. *Методи та прилади контролю якості*. 2012. № 2 (29). С. 102–112.

*Автором здійснений аналіз факторів, які у певний момент часу, за певних умов зовнішнього середовища визначають технічний стан відцентрового нагнітача природного газу.*

2. Горбійчук М. І., Медведчук В. М. Лінеаризована діагностична модель відцентрового нагнітача природного газу. *Науковий вісник ІФНТУНГ*. 2013. № 1. С. 146–155.

*Автором розроблено метод параметричної ідентифікації параметрів математичної моделі відцентрового нагнітача природного газу.*

3. Горбійчук М. І., Слабінога М. О., Медведчук В. М. Паралельний алгоритм синтезу моделей оптимальної складності на засадах генетичних алгоритмів. *Методи та прилади контролю якості*. 2013. № 2(31). С. 99–108.

*Автором досліджено паралельний алгоритм синтезу моделей оптимальної складності.*

4. Горбійчук М. І., Медведчук В. М., Пашковський Б. В. Паралелізм алгоритму синтезу моделей оптимальної складності на засадах генетичних алгоритмів. *Восточно-Европейский журнал передовых технологий*. 2014. № 4/2 (70). С. 42–48. (входить до наукометричної бази *Index Copernicus*)

*Автором досліджений алгоритм синтезу емпіричних моделей оптимальної складності, що ґрунтується на засадах генетичних алгоритмів.*

5. Горбійчук М. І., Медведчук В. М. Метод параметричної ідентифікації технічного стану двоступеневого відцентрового нагнітача природного газу. *Нафтогазова енергетика*. 2015. № 1 (23). С. 78–85.

*Автором розроблена математична модель двоступеневого нагнітача природного газу.*

6. Горбійчук М. І., Скріпка О. А., Медведчук В. М. Метод оцінки технічного стану двоступеневого відцентрового нагнітача природного газу на засадах нечіткої логіки. *Нафтогазова енергетика*. 2015. № 2 (24). С. 59–68.

*Автором запропонована експертна система оцінки технічного стану двоступеневого нагнітача природного газу на основі нечіткої логіки.*

7. Горбійчук М. І., Медведчук В. М., Лазорив А. Н. Анализ параллельного алгоритма синтеза эмпирических моделей на принципах генетических алгоритмов. *Международный научно-технический журнал «Проблемы управления и информатики»*. 2016. № 1. С. 112–130. (входить до наукометричної бази Scopus)

Gorbiiyчук Mikhail I., Medvedchuk Vera M, Lazoriv Alla N. Analysis of Parallel Algorithm of Empirical Models Synthesis on Principles of Genetic Algorithms. *Journal of Automation and Information Sciences*. 2016. vol. 48, is.2. P. 54–73

*Автором удосконалено метод побудови емпіричної моделі оптимальної складності з використанням генетичного підходу та паралельного алгоритму.*

8. Горбійчук М. І., Гарасимів В. М., Гарасимів Т. Г. Комп'ютерна система контролю параметрів технічного стану двоступеневого нагнітача природного газу. *Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ*. 2018. № 1 (66). С. 85–92.

*Автором синтезована система контролю параметрів технічного стану двоступеневого нагнітача природного газу*

9. Гарасимів В. М., Гарасимів Т. Г., Мойсенко О. В. Система оцінювання технічного стану проточної частини двоступеневого нагнітача природного газу на основі нечіткої логіки. *Методи та приклади контролю якості*. 2018. № 1 (40). С. 70–78.

*Автором синтезовано систему оцінювання технічного стану проточної частини двоступеневого ВЦН природного газу.*

*Праці, що засвідчують апробацію матеріалів дисертації:*

10. Горбійчук М. І., Медведчук В. М. Метод і алгоритм оцінки технічного стану відцентрового нагнітача природного газу. *АВТОМАТИКА 2013* : матеріали ХХ міжнар. конф. з автоматичного управління, м. Миколаїв, 25-27 вересня 2013 р. Миколаїв, 2013. С. 339–340.

*Автором досліджено вплив несправностей проточної частини відцентрового нагнітача природного газу.*

11. Горбійчук М. І., Медведчук В. М., Лазорів О. Т. Діагностична модель відцентрового нагнітача природного газу. *Інформаційні технології в освіті, техніці та промисловості* : тези доп. всеукр. наук.-практ. конф. аспірантів, молодих вчених і студентів (м. Івано-Франківськ, 8-11 жовтня 2013 р.). Івано-Франківськ, 2013. С. 155–157.

*Автором побудована емпірична модель відцентрового нагнітача природного газу із використанням індуктивного методу самоорганізації моделей.*

12. Горбійчук М. І., Медведчук В. М., Лазорів А. М. Синтез емпіричних моделей оптимальної складності з використанням паралельних алгоритмів. *Інформаційні проблеми комп'ютерних систем, юриспруденції, енергетики,*

економіки, моделювання та управління : зб. матеріалів міжнар. наукової координаційної наради, м. Тернопіль, 2014 р. Тернопіль, 2014. С. 61–64.

*Автором досліджено процес синтезу емпіричних моделей оптимальної складності.*

13. Горбійчук М. І., Медведчук В. М. Паралельний алгоритм синтезу емпіричних моделей оптимальної складності на засадах генетичних алгоритмів. *АВТОМАТИКА 2014* : матеріали XXI міжнар. конф. з автоматичного управління, м. Київ, 23-27 вересня 2014 р. Київ, 2014. С. 194–195.

*Автором запропонований паралельний алгоритм синтезу емпіричних моделей оптимальної складності на засадах генетичних алгоритмів.*

14. Horbiychuk M. I., Medvedchuk V. M., Lazoriv A. M. Parallel algorithm for synthesis of optimal complexity empirical models with observational errors. *Creation as the factor of evolutionary development and the society's aspiration to perfection : the LXXXVIII International Research and Practice Conference, London, 28 August – 02 September 2014. London, 2014. P. 75–78. (входить до наукометричної бази Socrates Impulse)*

*Автором досліджено процес реалізації генетичного алгоритму синтезу емпіричних моделей.*

## АНОТАЦІЯ

*Гарасимів В. М.* Ідентифікація та контроль параметрів двоступеневого відцентрового нагнітача природного газу із використанням методів штучного інтелекту. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук (доктора філософії) за спеціальністю 05.13.07 – Автоматизація процесів керування – Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу, Івано-Франківськ, 2018.

Дисертацію присвячено розробленню методу контролю параметрів двоступеневого ВЦН природного газу із використанням його математичної моделі, реалізація якого у складі САК КС дає змогу оперативно відслідковувати роботу ВЦН, аналізувати і відстежувати передаварійні ситуації, що приведе до скорочення втрат газу завдяки своєчасному втручанням в роботу ВЦН, а також скорочення кількості аварійних зупинок завдяки впровадженню нових алгоритмів із застосуванням методів штучного інтелекту.

Розроблено математичну модель двоступеневого відцентрового нагнітача природного газу, що виражає залежність продуктивності нагнітача природного газу від його технологічних та геометричних параметрів і враховує втрати на витоки газу та тертя дисків.

Удосконалено метод побудови емпіричної моделі ВЦН оптимальної складності з використанням генетичного підходу та паралельного алгоритму розв'язку системи лінійних алгебраїчних рівнянь із застосуванням методу Гаусса, що дає можливість підвищити ефективність обчислювального процесу.

Розроблено метод параметричної ідентифікації параметрів математичної моделі двоступеневого нагнітача природного газу, який дає змогу розрахувати

параметри нагнітача та їхнє відхилення від початкових значень, що відповідають умовам роботи нового ВЦН або після його капітального ремонту.

Розроблено прикладний програмний продукт підтримки задачі контролю параметрів двоступеневого нагнітача природного газу, що дає можливість інтегрувати його в існуюче програмне забезпечення SCADA-системи Citect, а його реалізація дає змогу зменшити затрати газу й собівартість ремонтно-профілактичних робіт.

**Ключові слова:** компримування газу, ідентифікація, генетичні алгоритми, нечітка логіка, емпірична модель, індуктивний метод самоорганізації моделей, паралельний алгоритм.

## АННОТАЦІЯ

*Гарасимов В. М.* Идентификация и контроль параметров двухступенчатого центробежного нагнетателя природного газа с использованием методов искусственного интеллекта. – Квалификационный научный труд на правах рукописи.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук (доктора философии) по специальности 05.13.07 «Автоматизация процессов управления». – Ивано-Франковский национальный технический университет нефти и газа, Ивано-Франковск, 2018.

Диссертация посвящена разработке метода контроля параметров двухступенчатого ВЦН природного газа с использованием его математической модели, реализация которого в составе САК КС дает возможность оперативно отслеживать работу ВЦН, анализировать и отслеживать предаварийные ситуации, что приведет к сокращению потерь газа за счет своевременного вмешательства в работу ВЦН, а также к сокращению количества аварийных остановок за счет внедрения новых алгоритмов с применением методов искусственного интеллекта.

Разработана математическая модель двухступенчатого центробежного нагнетателя природного газа, которая выражает зависимость производительности нагнетателя природного газа от его технологических и геометрических параметров и учитывает потери на протечки газа и трения дисков.

Усовершенствован метод построения эмпирической модели ВЦН оптимальной сложности с использованием генетического подхода и параллельного алгоритма решения системы линейных алгебраических уравнений с применением метода Гаусса, что дает возможность повысить эффективность вычислительного процесса.

Разработан метод параметрической идентификации параметров математической модели двухступенчатого нагнетателя природного газа, который позволяет рассчитать параметры нагнетателя и их отклонения от начальных значений, соответствующих условиям работы нового ВЦН или после его капитального ремонта.

Разработан прикладной программный продукт поддержки задачи контроля параметров двухступенчатого нагнетателя природного газа, который дает

возможность интегрировать его в существующее программное обеспечение SCADA-системы Citect и реализация которого позволяет уменьшить затраты газа и себестоимость ремонтно-профилактических работ.

**Ключевые слова:** компримирование газа, идентификация, генетические алгоритмы, нечеткая логика, эмпирическая модель, индуктивный метод самоорганизации моделей, параллельный алгоритм.

### ABSTRACT

*Harasymiv V. M.* Identification and control of parameters of the two-stage centrifugal compressor of natural gas using artificial intelligence methods. – The manuscript.

Thesis for the Candidate of technical Sciences (the Doctor of Philosophy) by specialty 05.13.07 “Automation of control processes. - Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas, Ivano-Frankivsk, 2018.

The thesis is dedicated to the development of the control method of parameters of the two-stage centrifugal compressor of natural gas using its mathematical model. Implementation of the method in the automatic control system of the compressor station gives the opportunity to watch the operation of the centrifugal compressor and to keep track of pre-damage situations throughout timely interruption of operation of the centrifugal compressor. In addition, it is possible to reduce the number of unrequested stops due to the implementation of new algorithms using methods of artificial intelligence.

The mathematical model of the two-stage centrifugal compressor is developed, which shows the dependence of the centrifugal compressor productivity on its technological and geometrical parameters and considers losses in gas flow and friction of disks.

The method for the optimal complexity empirical model building is improved based on genetic algorithms and the parallel algorithm for solving linear equation systems by the Gauss, which gives an opportunity to increase the computation efficiency.

The parametric identification method for the mathematical model of the two-stage centrifugal compressor is developed which makes it possible to determine its parameters and their deviation from the initial values, which corresponds to conditions where the centrifugal compressor is a new one or after its overhaul.

Application software for the control of parameters of the two-stage centrifugal compressor is developed, which gives the opportunity of its integration into existing software SCADA system Citect and allows to reduce gas losses and the cost of repair or preventive maintenance.

**Keywords:** gas compression, identification, genetic algorithms, fuzzy logic, empirical model, inductive method of models self-organization, parallel algorithm.