

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

Кваліфікаційна наукова  
праця на правах рукопису

ГАРАСИМІВ ВІРА МИХАЙЛІВНА

УДК 681.518.5.015:621.515

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

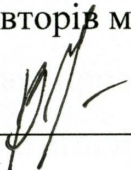
Спеціальність 05.13.07 – автоматизація процесів керування

Галузь знань 15 – автоматизація та приладобування

Подається на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук (доктора філософії)

Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело.

(підпис)

  
В. М. Гарасимів

Науковий керівник: **Горбійчук Михайло Іванович**, доктор технічних наук, професор.  
*Ідентифікація всіх параметрів дисертації завірено*  
*Вчений секретар спеціалізованої вченої ради Д20.052.03*

*О.П. 10.6. Барна*

Підпис(и)

Івано-Франківськ – 2018

## 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.

У дисертаційному дослідженні вирішено актуальне науково-прикладне завдання підвищення ефективності роботи двоступеневого відцентрового нагнітача природного газу 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.

Аналізовано літературні джерела та розглянуто відцентровий нагнітач як об'єкт автоматичного керування. Наведено аналіз впливу основних геометричних параметрів відцентрового нагнітача на процес компримування газу. Розглянуто сучасні методи контролю та ідентифікації параметрів нагнітачів, а також їхні математичні моделі.

На основі проведеного аналізу сучасних методів контролю параметрів відцентрових нагнітачів встановлено, що для зменшення собівартості проведення планово-попереджувальних ремонтів та підвищення ефективності роботи нагнітачів необхідне розроблення та інтегрування до складу існуючої системи автоматичного керування компресорною станцією системи оцінювання технічного стану проточної частини відцентрового нагнітача, яка б разом із відповідною його математичною моделлю забезпечить контроль його параметрів в умовах експлуатації нагнітача, що,

в свою чергу, дозволить простежити за появою і розвитком поступових відмов, визначити інтенсивність їхнього розвитку.

Також проведений аналіз показав, що існуючі математичні моделі, в основному, призначені для одноступеневих нагнітачів. Оскільки більша частина нагнітачів, які постачає промисловість в останні роки, мають два ступені стиснення газу, то постає завдання побудови математичної моделі двоступеневого відцентрового нагнітача природного газу. Тому на основі рівнянь матеріального та енергетичного балансів розроблено математичну модель для двоступеневого відцентрового нагнітача природного газу, що виражає залежність продуктивності нагнітача природного газу від його технологічних та геометричних параметрів із врахуванням втрат на витоки газу і тертя дисків.

Відомо, що найбільший вплив на технічний стан нагнітача має збільшення зазорів в ущільненнях покривального диску порівняно з ерозійним зношенням, оскільки робочі колеса нагнітачів виходять з ладу до того, як ступінь ерозійного зношення лопаткового апарату робочого колеса нагнітача досягне рівня, що істотно знижує політропний коефіцієнт корисної дії. Тому параметри отриманої математичної моделі, які залежать від радіального зазору в ущільненні покривального диску, ширини та середньої товщини лопаток кожного із двох коліс нагнітача, розглянуто як параметри технічного стану двоступеневого нагнітача природного газу. Оскільки поява будь-якого дефекту в проточній частині нагнітача викликає зміну його геометричних та технологічних параметрів, то для оцінювання технічного стану його проточної частини запропоновано визначати відхилення цих параметрів від їхніх початкових значень, які визначені для нового нагнітача або після його капітального ремонту.

Розроблено метод параметричної ідентифікації параметрів технічного стану двоступеневого відцентрового нагнітача природного газу, які відповідають умовам роботи нового нагнітача або після його капітального ремонту, та величин коефіцієнта корегування кінцевої остаточної кількості лопаток і коефіцієнта, значення якого залежить від технології обробки лопаток колеса нагнітача. Для ідентифікації цих

параметрів використано метод найменших квадратів, в якому для мінімізації розв'язання цільової функції застосовано генетичний алгоритм.

Запропоновано метод контролю параметрів двоступеневого відцентрового нагнітача природного газу, який враховує втрати газу у його проточній частині, що дає змогу визначити сукупність технологічних параметрів, за якими можна оцінювати стан проточної частини нагнітача в процесі його експлуатації. Експериментально перевірено розроблений метод для двоступеневого відцентрового нагнітача природного газу типу 650-21-2 Богородчанського лінійного виробничого управління магістральними газопроводами. Експлуатаційні характеристики роботи нагнітача фіксували на протязі місяця до капітального ремонту і на протязі місяця після нього.

Програма досліджень передбачала отримання таких даних для побудови математичної моделі двоступеневого відцентрового нагнітача природного газу: об'ємна продуктивність нагнітача, перепад тиску на входному конфузори нагнітача, тиск газу на вході і виході нагнітача, температура газу на вході і виході нагнітача, атмосферний тиск, частота обертання ротора нагнітача, густина природного газу.

Ідентифікацію параметрів технічного стану двоступеневого відцентрового нагнітача природного газу типу 650-21-2, що відповідають умовам роботи нового нагнітача або після його капітального ремонту, здійснено із використанням генетичних алгоритмів та оптимізаційного методу Нелдера-Міда. Результати досліджень показали, що використання генетичних алгоритмів для ідентифікації параметрів математичної моделі двоступеневого нагнітача природного газу порівняно з оптимізаційним методом Нелдера-Міда є більш ефективним, оскільки забезпечує кращу збіжність експериментальних значень до розрахункових.

Для усунення фактора залежності продуктивності нагнітача від його технологічних параметрів і виявлення зміни продуктивності нагнітача від параметрів технічного стану двоступеневого відцентрового нагнітача природного газу удосконалено метод побудови його емпіричної моделі 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.

Для реалізації емпіричної моделі двоступеневого відцентрового нагнітача природного газу розроблено алгоритм оптимальної складності, що відбувається у два етапи. На етапі генерування часткових моделей різної складності експериментальні дані, що входять до емпіричної моделі, приведено до безрозмірного вигляду та поділено на дві множини: навчальну та перевірну відповідно для вибраного критерію селекції. Формування структур часткових моделей реалізовано за принципом роботи двійкового лічильника, до останнього ряду якого додається одиниця. На другому етапі синтезовано моделі оптимальної складності на засадах генетичних алгоритмів та знайдено єдину емпіричну модель двоступеневого відцентрового нагнітача природного газу.

Враховуючи об'єктивно існуючу нечіткість інформації про об'єкт, синтезовано структуру системи оцінювання технічного стану проточної частини двоступеневого відцентрового нагнітача природного газу, що складається з окремих модулів. На основі синтезованої системи зроблено висновок, що технічний стан проточної частини двоступеневого відцентрового нагнітача природного газу типу 650-21-2 – допустимий (дефазифікація вихідної лінгвістичної змінної методом центра ваги приводить до значення 0,5). Даний результат співпадає із реальним станом нагнітача, оскільки прямі виміри при розкритті проточної частини нагнітача дали середнє значення радіального зазору 0,8 мм (за номінальної величини зазору 0,5 мм), що свідчить про незначне погіршення технічного стану проточної частини двоступеневого відцентрового нагнітача природного газу типу 650-21-2.

Знайшов подальший розвиток метод синтезу системи контролю параметрів двоступеневого відцентрового нагнітача природного газу, яка розгорнута у вигляді автоматизованого робочого місця на базі серійних персональних електронних обчислювальних машин і входить до складу інтегрованої системи керування

Богородчанським лінійним виробничим управлінням магістральними газопроводами, що має чотирирівневу ієрархічну структуру.

Розроблено алгоритми і програмне забезпечення для розв'язання задачі ідентифікації та контролю параметрів двоступеневого відцентрового нагнітача природного газу, що дозволяють аналізувати і відстежувати технічний стан проточної частини нагнітача під час його експлуатації. Програмне забезпечення задачі контролю параметрів двоступеневого відцентрового нагнітача природного газу оформлено у вигляді прикладного програмного модуля, написаного об'єктно-орієнтованою мовою Delphi, із можливістю його інтегрування в існуюче програмне забезпечення SCADA-системи Citect верхнього рівня керування Богородчанським лінійним виробничим управлінням магістральними газопроводами. Основні положення дисертаційної роботи успішно апробовані та впроваджені.

**Ключові слова:** компримування газу, об'єкт автоматичного керування, радіальний зазор, капітальний ремонт, ідентифікація, генетичні алгоритми, нечітка логіка, емпірична модель, індуктивний метод самоорганізації моделей, паралельний алгоритм, SCADA-система.

## **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.

1

*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*)

Gorbiychuk 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., Мойсеєнко О. В. Система оцінювання технічного стану проточної частини двоступеневого нагнітача природного газу на основі нечіткої логіки. *Методи та прилади 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. 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.*

## 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.

Topical scientific and practical task of improving the efficiency of the two-stage centrifugal compressor of natural gas has been solved in the thesis by developing and improving methods for control and identification of its parameters with the application of artificial intelligence methods to monitor the technical state of the two-stage centrifugal compressor volute. It gives an opportunity to reduce gas losses during the compression process.

The literary analysis was done. The centrifugal compressor was considered as the automatic control object. The analysis of the influence of main geometric parameters of the centrifugal compressor on the compression process was given. Modern methods for control and identification of centrifugal compressor parameters and their mathematical models were considered.

Based on the analysis of modern methods for control of centrifugal compressor parameters it has been established the necessity for the developing and integration of the estimation system of the technical state of the two-stage centrifugal compressor volute in the automatic control system of the compressor station, which makes it possible to reduce the cost of preventive repairs and to improve the centrifugal compressor efficiency. The integration of the estimation system of the technical state of the two-stage centrifugal compressor will provide the opportunity to control its operation and to keep track of pre-damage situations.

The analysis showed that existing mathematical models were mainly used for single-stage centrifugal compressors. Since most of compressors supplied by modern industries have two stage of gas compression, the task is to build the mathematical model of the two-stage centrifugal compressor of natural gas. Therefore, based on material and energy balance equations the mathematical model of the two-stage centrifugal compressor has been built, 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.

It is known that the increase of radial gaps in cover-disk seals has a greater influence on the technical state of the centrifugal compressor than erosion, because centrifugal compressor impellers have failed than erosion would significantly reduce the energy conversion efficiency. Therefore, parameters of the mathematical model depended on the radial gap in cover-disk seal, the width and the average thickness of centrifugal compressor blades of each wheel were named as parameters of the technical state of the two-stage centrifugal compressor of natural gas. Deviations in these parameters from their initial values, which correspond to the conditions where the centrifugal compressor is a new one or after its overhaul, were determined, because defects in the two-stage centrifugal compressor volute change its geometrical and technological parameters.

The parametric identification method for initial parameters of the technical state of the two-stage centrifugal compressor of natural gas, values of the correction coefficient of the final number of blades and the coefficient depended on the technology of blade processing has been developed. The least squares method was used for these parameters identification, in which the genetic algorithm was being used to minimize the objective function.

The control method of parameters of the two-stage centrifugal compressor of natural gas, which takes into account gas losses in the compressor volute, has been developed. It allows to determine the set of technological parameters for the estimating of the technical state of the compressor volute during its operation. The developed method for the two-stage centrifugal compressor 650-21-2 used at Bogorodchany linear production administration of gas transmittal pipelines has been experimentally tested. The performance characteristics of the centrifugal compressor were fixed during the month before its overhaul and within the month after it.

Such data as the compressor productivity, the pressure drop in the compressor confuser, the inlet and outlet gas pressures of the compressor, the inlet and outlet compressor temperatures, the atmospheric pressure, the frequency of the rotor and the

density of natural gas were fixed corresponded to the research program for building the mathematical model of the two-stage centrifugal compressor.

The identification of initial parameters of the technical state of the two-stage centrifugal compressor 650-21-2 has been performed using the genetic algorithm and the Nelder–Mead method. Research has shown that the genetic algorithm for the identification of initial parameters is more efficient than the Nelder–Mead method, because it provides the better convergence of experimental values towards the calculated ones.

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 method for the optimal complexity empirical model building has been improved to eliminate the dependence of the compressor productivity on its technological parameters and to determine the dependence of the compressor productivity on parameters of the technical state of it.

The optimal complexity algorithm consisted of two stages has been developed to implement the empirical model of the two-stage centrifugal compressor. At the stage of generating partial varying complexity models, the experimental data included in the empirical model were written in the dimensionally reduced form and divided into two sets: the training and testing sets correspond to the selection criteria. The formation of partial models structures was realized based on the operation of a binary counter by adding unit to the last row of it. At the second stage optimal complexity models were synthesized based on genetic algorithms and the single empirical model of the two-stage centrifugal compressor was found.

Using the existing object fuzziness, the estimation system of the technical state of the volute of the two-stage centrifugal compressor, consisting of separate modules, has been developed. Based on the rule base and data processing, it was concluded that the volute technical state of the two-stage centrifugal compressor 650-21-2 was acceptable (defuzzification with the center-of-gravity technique gave the result equal to 0,5). This result coincided with the real state, because direct measurements of the opened centrifugal compressor volute gave the average value of the radial gap in cover-disk seal equal to 0,8

mm (the nominal value of the gap is 0,5 mm). Obtained results confirmed the average deterioration of the volute technical state of the two-stage centrifugal compressor 650-21-2.

The further development of the synthesis method of the control parameters system of the two-stage centrifugal compressor has been found, which was represented by the automated workplace based on serial personal computers as the part of the integrated control system of Bogorodchany linear production administration of gas transmittal pipelines with four-level hierarchical organizational structure.

Application software and algorithms for the parameters control and identification of the two-stage centrifugal compressor have been developed, which allow to analyze and monitor the technical state of the centrifugal compressor volute during the compression process.

Application software for the control of parameters of the two-stage centrifugal compressor was organized like the application program module, written in the object-oriented language Delphi, and with the opportunity of its integration into existing software SCADA system Citect of the upper control level of Bogorodchany linear production administration of gas transmittal pipelines. The main provisions of the dissertation have been successfully tested and implemented.

**Keywords:** gas compression, automatic control object, radial gap, overhaul, identification, genetic algorithms, fuzzy logic, empirical model, inductive method of models self-organization, parallel algorithm, SCADA system.

## ЗМІСТ

<b>ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ, ОДИНИЦЬ, СКОРОЧЕНЬ ТА ТЕРМІНІВ .....</b>	<b>17</b>
<b>ВСТУП.....</b>	<b>18</b>
<b>РОЗДІЛ 1. ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРНИХ ДЖЕРЕЛ .....</b>	<b>24</b>
1.1 Відцентровий нагнітач як об’єкт автоматичного керування .....	24
1.2 Аналіз впливу основних геометричних параметрів ВЦН на процес компримування газу.....	26
1.3 Аналіз методів ідентифікації та контролю параметрів нагнітачів .....	32
1.4 Математичні моделі нагнітачів природного газу .....	39
1.5 Вибір і обґрунтування напрямку досліджень .....	42
<b>РОЗДІЛ 2. ТЕОРЕТИЧНІ ЗАСАДИ МЕТОДІВ ІДЕНТИФІКАЦІЇ ТА КОНТРОЛЮ ПАРАМЕТРІВ ДВОСТУПЕНЕВОГО ВЦН ПРИРОДНОГО ГАЗУ .....</b>	<b>44</b>
2.1 Математична модель двоступеневого ВЦН природного газу .....	44
2.2 Лінеаризована математична модель двоступеневого ВЦН природного газу.....	60
2.3 Емпірична модель двоступеневого ВЦН природного газу.....	63
2.4 Метод визначення зміни параметрів технічного стану двоступеневого ВЦН природного газу .....	68
Висновки до розділу.....	70
<b>РОЗДІЛ 3. МЕТОДИКА ПРОВЕДЕННЯ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ НА ОБ’ЄКТІ.....</b>	<b>71</b>
3.1 Умови проведення експериментальних досліджень.....	71
3.2 Методи та технічні засоби ідентифікації і контролю параметрів нагнітачів на КС-39 «Прогрес» .....	75
3.3 Розроблення методу контролю параметрів двоступеневого ВЦН природного газу.....	77

3.3.1 Ідентифікація параметрів математичної моделі двоступеневого ВЦН природного газу з використанням генетичних алгоритмів та оптимізаційного методу Нелдера-Міда .....	78
3.3.2 Синтез емпіричної моделі двоступеневого ВЦН природного газу на засадах генетичних алгоритмів .....	80
3.4 Система оцінювання технічного стану проточної частини двоступеневого ВЦН природного газу на основі нечіткої логіки .....	93
3.5 Експериментальна перевірка системи оцінювання технічного стану проточної частини двоступеневого ВЦН природного газу під час його експлуатації.....	111
Висновки до розділу.....	114
<b>РОЗДІЛ 4. КОМП'ЮТЕРНА СИСТЕМА КОНТРОЛЮ ПАРАМЕТРІВ ДВОСТУПЕНЕВОГО ВЦН ПРИРОДНОГО ГАЗУ .....</b>	<b>116</b>
4.1 Структура системи контролю параметрів двоступеневого ВЦН природного газу.....	116
4.2 Коротка характеристика системи автоматичного керування .....	117
4.3 Спеціальне програмне забезпечення системи контролю параметрів двоступеневого ВЦН природного газу .....	124
Висновки до розділу.....	137
<b>ВИСНОВКИ .....</b>	<b>138</b>
<b>СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ .....</b>	<b>140</b>
ДОДАТОК А. Список опублікованих праць за темою дисертації .....	154
ДОДАТОК Б. Розв'язок рівняння (2.30) стосовно продуктивності нагнітача природного газу.....	157
ДОДАТОК В. Знаходження часткових похідних лінеаризованої математичної моделі контролю параметрів двоступеневого ВЦН природного газу .....	159
ДОДАТОК Г. Програма ідентифікації параметрів двоступеневого ВЦН природного газу із використанням ГА.....	163

ДОДАТОК Д. Програма ідентифікації параметрів двоступеневого ВЦН природного газу із використанням методу Нелдера-Міда.....	169
ДОДАТОК Е. Побудова емпіричної моделі двоступеневого ВЦН природного газу .....	177
ДОДАТОК Є. Програма обчислення зміни параметрів технічного стану двоступеневого ВЦН.....	194
ДОДАТОК Ж. Програма експертної системи контролю параметрів двоступеневого ВЦН.....	195
ДОДАТОК З. Програма налаштування вагових коефіцієнтів експертної системи контролю параметрів двоступеневого ВЦН .....	199
ДОДАТОК І. Текст програми-інтегратора .....	201



**ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ, ОДИНИЦЬ,  
СКОРОЧЕНЬ ТА ТЕРМІНІВ**

КС	— компресорна станція	АСК	— автоматизована система керування
ГТС	— газотранспортна система	АРМ	— автоматизоване робоче місце
САК	— система автоматичного керування	БД	— база даних
ВЦН	— відцентровий нагнітач	ТП	— технологічний процес
КР	— капітальний ремонт	УМГ	— управління магістральними газопроводами
ГПА	— газоперекачувальний агрегат	SCADA	— диспетчерське управління і збір даних (Supervisory Control and Data Acquisition)
РК	— робоче колесо	ПЗ	— програмне забезпечення
БЛД	— безлопатковий дифузор	ПЛК	— програмований логічний контролер
ЛД	— лопатковий дифузор	ВМ	— виконавчий механізм
ЛВУМГ	— лінійне виробниче управління магістральними газопроводами	ЗІ	— змінний інженер
ГТД	— газотурбінний двигун	ПЗ «ППП»	— програмне забезпечення періодичної перевірки працездатності апаратури
ЕОМ	— електронна обчислювальна машина		
МНК	— метод найменших квадратів		
МГУА	— метод групового урахування аргументів		
ГА	— генетичний алгоритм		

## ВСТУП

**Актуальність роботи.** 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 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., Галеркина Ю. Б., Галиуллина З. Т., Парафейника В. П. та інших. Вони провели газодинамічний розрахунок параметрів проточної частини ВЦН 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 Івано-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.

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 витіки 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 задачі контролю параметрів двоступеневого ВЦН із можливістю його інтеграції 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 на 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 [78] – 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; [82] – розроблено метод параметричної ідентифікації, що складається з двох етапів визначення параметрів технічного стану ВЦН. На першому етапі для нового ВЦН (або після його капітального ремонту) визначають усі параметри, а на другому етапі – тільки ті параметри, зміна яких викликана експлуатаційними факторами; [83] – розроблено метод параметричної ідентифікації параметрів математичної моделі ВЦН природного газу; [84] – запропоновано метод і алгоритм оцінки технічного стану відцентрового нагнітача природного газу; [85] – розроблено емпіричну модель відцентрового нагнітача природного газу із використанням індуктивного методу самоорганізації моделей; [106, 107] – аналізовано метод побудови емпіричних моделей оптимальної складності на засадах генетичних алгоритмів оптимальної складності на паралелізм; [108] – для зменшення часу обчислень запропоновано розпаралелити алгоритм синтезу моделей оптимальної складності; [109] – розроблено паралельні алгоритми та визначено їхні характеристики – прискорення і ефективність; [110] – розроблено метод синтезу емпіричних моделей з використанням генетичних алгоритмів. Для підвищення ефективності обчислювального процесу розроблено паралельний алгоритм; [111] – для виявлення ефективності паралельних алгоритмів синтезу моделей оптимальної складності обчислено кількість арифметичних операцій при реалізації паралельних алгоритмів;

[123] – синтезовано систему оцінювання технічного стану проточної частини двоступеневого ВЦН природного газу із використанням основних понять та визначень нечіткої логіки; [125] – розроблено метод оцінювання технічного стану двоступеневого нагнітача природного газу на основі ідентифікації параметрів лінеаризованої моделі, що ґрунтується на системі нечіткого висновку типу Мамдані; [127] – синтезована система контролю параметрів технічного стану двоступеневого нагнітача природного газу.

**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.

## РОЗДІЛ 1

### ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРНИХ ДЖЕРЕЛ

#### 1.1 Відцентровий нагнітач як об'єкт автоматичного керування

ГТС України на сьогодні є її національним багатством, чинником її економічного зростання та розвитку. Протягом свого більш ніж 60-літнього існування вона стала складним виробничо-технологічним комплексом, що включає в себе газові магістралі довжиною майже 40 тисяч кілометрів [1]. Забезпечення ефективного функціонування ГТС, надійного і стабільного транзиту газу через територію України до Європи потребує розвитку ефективних методів ідентифікації й контролю параметрів основного обладнання української ГТС, що дає змогу збільшити продуктивність та надійність функціонування газотранспортних систем.

До складу ГТС України входять 71 компресорна станція (121 компресорний цех) із 708 газоперекачувальними агрегатами (ГПА): зокрема 441 агрегат із газотурбінним приводом, що становить 80 % від загальної потужності, 171 – з електроприводом і 96 газомотокомпресорів. Розрізняють одноступеневі відцентрові нагнітачі зі ступенем підвищення тиску 1,23 – 1,25 і двоступеневі, що забезпечують ступінь підвищення тиску в межах 1,45 – 1,7 [2-7].

ВЦН як об'єкт автоматичного керування характеризується рядом факторів, які загалом визначаються як вхідні, вихідні величини та збурення. Для того щоб врахувати вплив цих факторів на об'єкт автоматичного керування, розглянемо загальну структурну схему системи автоматизації роботи ВЦН (рис. 1.1), що складається із самого об'єкта автоматичного керування та САК.

Завдяки певній взаємодії між об'єктом автоматичного керування і САК ВЦН забезпечується необхідний результат його функціонування, що характеризується вихідними факторами (група  $Y$ ). Якщо ВЦН розглядати як об'єкт контролю технічного стану, то фактори групи  $Y$  слід розділити на фактори, що мають діагностичну цінність (група  $Y_{dv}$ ), та інші (група  $Y_{ndv}$ ) [8].



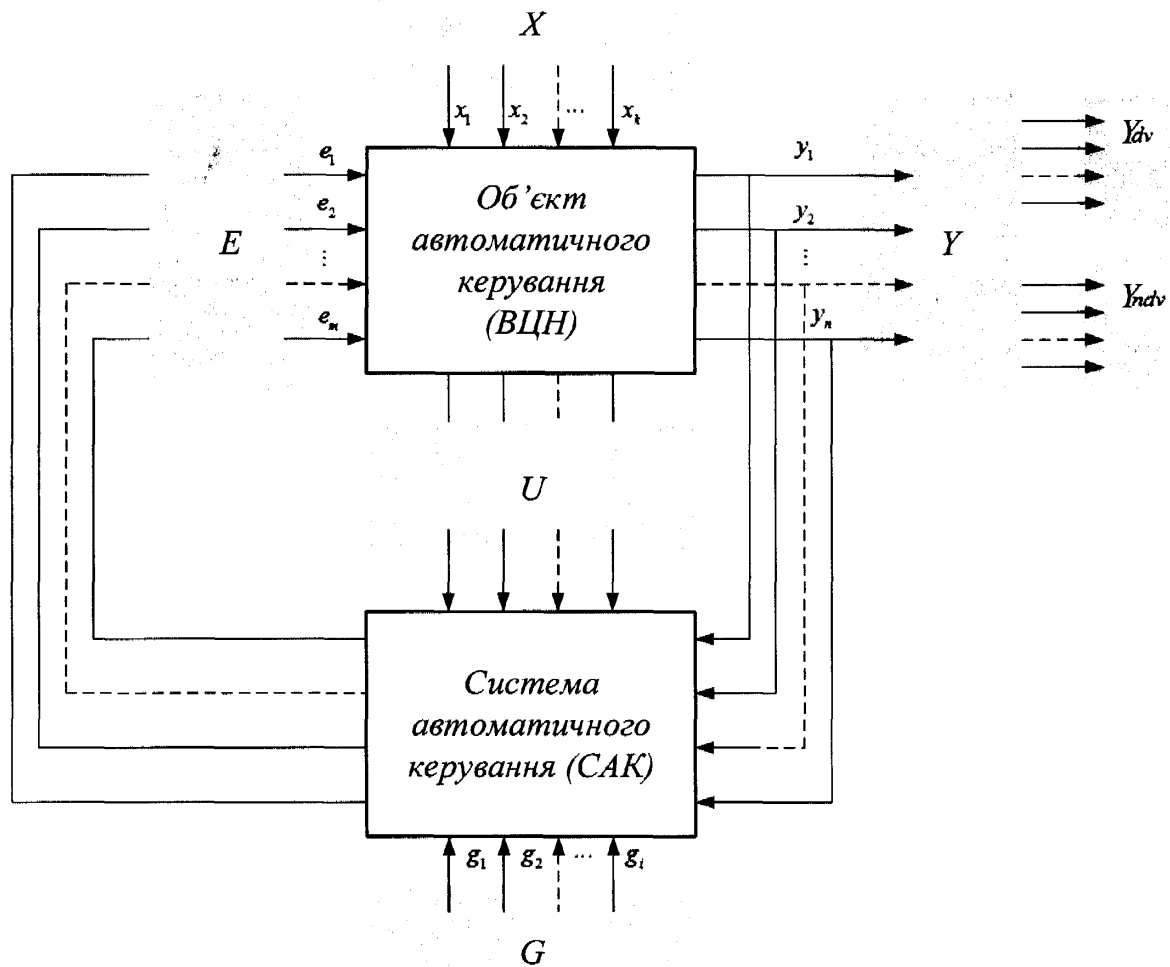


Рис. 1.1. Фактори, що визначають функціонування ВЦН як об'єкта автоматичного керування

Фактори групи  $Y_{dv}$  є функціями не тільки вхідних величин групи  $X$ , але й залежать від внутрішніх чинників роботи ВЦН [8]. До них можна віднести геометричні розміри робочого колеса (РК) ВЦН, зміну геометрії підшипників, зміну зазору в кінцевих ущільненнях та ін.

Вхідні величини характеризуються факторами групи  $X$ , що не підлягають цілеспрямованій зміні. Фактори групи  $X$ , у свою чергу, можна поділити на контрольовані (група  $Z$ ) та неконтрольовані фактори (група  $V$ ). Як приклад до факторів групи  $Z$  можна навести тиск, температуру, продуктивність на вході

відцентрового нагнітача, температуру і тиск атмосферного повітря та ін. До групи  $V$  можна віднести густину та хімічний склад природного газу, теплоту згоряння паливного газу та ін. У більшості випадків фактори групи  $X$  мають ймовірнісний характер, що вносить певну стохастичну складову в процес компримування природного газу.

Окрім факторів  $Y$  та  $X$ , функціонування ВЦН характеризується факторами групи  $U$ . Групу  $U$  утворюють керовані вхідні величини, через які реалізується процес компримування природного газу (витрата паливного газу, коефіцієнт надлишку повітря) [8].

Інформація про поточні значення факторів груп  $U$  та  $Y$  надходить у САК та порівнюється із відповідними значеннями факторів групи  $G$  (величини ВЦН, що відповідають роботі нового ВЦН або після КР, паспортним даним, встановленим граничним величинам та ін.). Як результат, система автоматизації роботи ВЦН здійснює керувальний вплив (фактори групи  $E$ ) на об'єкт автоматичного керування.

Отже, особливого значення контроль параметрів газоперекачувального обладнання набуває в міру розроблення автоматизованої системи, в рамках якої може бути реалізована комплексна система ідентифікації та контролю параметрів основного і допоміжного обладнання компресорних станцій.

## **1.2 Аналіз впливу основних геометричних параметрів ВЦН на процес компримування газу**

Більшість КС України використовують неповнонапірні однотипні нагнітачі, що працюють послідовно в режимі двоступеневого компримування газу. Як наслідок, об'ємна продуктивність ВЦН зменшуватиметься залежно від ступеня підвищення тиску газу, тому для уникнення зони помпажу у кожного наступного ВЦН робоче колесо є меншим за попереднє [9-13].

Аналізуванню впливу геометричних параметрів нагнітачів на їхню роботу, обчисленню втрат в її елементах для збільшення ефективності роботи ВЦН та зменшенню втрат газу присвячені численні теоретичні дослідження як зарубіжних,

так і вітчизняних авторів [14-26], які в основному використовують дослідження Еккерта, К. Пфлейдерера, А. Степанова, В. Траупеля. Значний внесок у даний напрямок науки зробив Рис В. Ф., який на основі експериментального матеріалу, у своїй роботі [15] досліджує втрати в елементах нагнітача та вплив окремих факторів конструкції проточної частини ВЦН на політропний к.к.д. і форму його теплотехнічних характеристик.

До складу проточної частини багатоступеневого ВЦН входять проміжна та кінцева ступені. Проміжна ступінь включає в себе робоче колесо, лопатевий або безлопатевий дифузор та зворотно-напрямний апарат. Кінцева ступінь нагнітача виводить газ із його проточної частини. Для запобігання витікання газу із порожнин проточної частини з високим тиском у порожнини з меншим тиском у конструкції ВЦН передбачені ущільнення. Збільшення к.к.д. нагнітачів визначається вибором оптимальної форми проточної частини.

Автори праць [14-20] досліджують гідравлічні втрати ВЦН, причинами яких є тертя та витікання газу в проточній частині. Втрати на витікання газу через ущільнення покривального диску характеризують коефіцієнтом  $\beta_{np}$ :

$$\beta_{np} = \frac{G_{np}}{G}, \quad (1.1)$$

де  $G_{np}$  – масова витрата газу через ущільнення покривального диску, кг/с;

$G$  – масова витрата газу в ступені нагнітача, кг/с.

Автори робіт [19, 20, 23] використовують формулу Стодоли для обчислення масової витрати газу через ущільнення покривального диску  $G_{np}$ :

$$G_{np} = \alpha \cdot \pi \cdot s_r \cdot D_s \cdot \rho_c \cdot \sqrt{\frac{2\Delta p}{Z_s \rho_c}}, \quad (1.2)$$

де  $\alpha$  – коефіцієнт витрати через лабіринтне ущільнення;

$\pi$  – приведений тиск;

$s_r$  – радіальний зазор, м;

$\rho_c$  – середня густина газу в ущільненні, кг/м<sup>3</sup>;

$D_s$  – діаметр ущільнення, м;

$Z_s$  – кількість ущільнень;

$\Delta p$  – перепад тиску в ущільненні, Па

Коефіцієнт витрати  $\alpha$  характеризує герметичність ущільнення, який для гладких ущільнень рівний 1,1, а для ступінчастих – 0,7 [15].

Зазори в лабіринтних ущільненнях роблять за можливості малими (0,15-0,2 мм), проте під час експлуатації вони збільшуються, тому для розрахунків рекомендовано приймати їхні значення вдвоє більшими, ніж на кресленнях. Для ВЦН їх можна розрахувати за формулою [14, 17]:

$$s_r = (0,2 + 0,4 \cdot D_2) \cdot 10^{-3}, \quad (1.3)$$

де  $D_2$  – зовнішній діаметр РК, м.

Автори роботи [16] для багатоступеневих ВЦН наближено визначають  $s_r$  як

$$s_r \approx \frac{D_y}{1000}, \quad (1.4)$$

де  $D_y$  – діаметр ущільнення, м.

Перепад тиску в ущільненні  $\Delta p$  розраховують за формулою Степанова [14]:

$$\frac{\Delta p}{\rho_c} = \frac{3}{4} \cdot \frac{u_2^2 - u_1^2}{2}, \quad (1.5)$$

де  $u_1$  – тангенційна складова абсолютної швидкості газу на вході ВЦН, м/с;

$u_2$  – тангенційна складова абсолютної швидкості газу на виході ВЦН, м/с.

Коефіцієнт  $\beta_{mp}$  характеризує втрати на тертя бокових поверхностей колеса [15]:

$$\beta_{mp} = \frac{h_{mp}}{h_T} = \frac{N_{mp}}{G \cdot h_T}, \quad (1.6)$$

де  $h_{mp}$  – напір газу, що характеризує втрати на тертя, кДж/кг;

$h_T$  – теоретичний напір газу, що йде на стиснення газу, кДж/кг;

$N_{mp}$  – втрати потужності, кВт.

Коефіцієнт  $\beta_{mp}$  можна записати також у такому вигляді [16]:

$$\beta_{mp} = \frac{102 N_{mp}}{G h_e}, \quad (1.7)$$

де  $h_e$  – напір газу, що визначається за формулою Ейлера, кДж/кг.

Втрати на тертя дисків  $N_{mp}$  автори [14,19] приймають за вимірюваннями Цумбуша:

$$N_{mp} = K_{mp} \cdot \rho_2 \cdot u_2^3 \cdot D_2^2 \cdot \left[ 1 - \left( \frac{D_1}{D_2} \right)^5 \right] \cdot 10^{-6}, \quad (1.8)$$

де  $K_{mp}$  – коефіцієнт тертя, що залежить від умовного числа Рейнольдса  $Re_{U2}$ , відношення бокового зазору  $B$  між диском та корпусом до діаметра  $D_2$  та відносної шорсткості. Оптимальне значення  $\frac{B}{D_2} = 0,01 \div 0,03$ ,

$$Re_{U2} = \frac{u_2 \cdot D_2}{2 \cdot \nu_2}, \quad (1.9)$$

де  $\nu_2$  – коефіцієнт кінематичної в'язкості, м<sup>2</sup>/с.

Якщо  $Re_{U2} < 10^6$ , то шорсткість не впливає на  $K_{mp}$ , проте за більших значень  $Re_{U2}$  вона зростає [15].

Втрати потужності на тертя обчислюють також за допомогою формул Степанова та Пфлейдерера [14-16]:

$$N_{mp} = k_T \rho_2 D_2^2 u_2^3, \quad (1.10)$$

де  $k_T$  – постійний коефіцієнт, значення якого залежить від технології обробки лопаток колеса нагнітача;

$\rho_2$  – густина газу на виході ВЦН, кг/м<sup>3</sup>.

Правильність наведених вище формул не доведена, оскільки вони отримані під час дослідження обертання відносно тонких дисків у закритому циліндричному просторі. Коефіцієнт  $\beta_{mp}$  може і позитивно впливати на політропний к.к.д. ВЦН,

оскільки певна частини енергії, виділена внаслідок тертя, йде на стиснення газу. Тому при розрахунку  $N_{mp}$  потрібно детально дослідити конструкцію РК. Якщо  $Re_{U_2} < 10^6$ , то зручніше використовувати формулу (1.10), а якщо  $Re_{U_2} > 10^6$  – то формулу (1.8).

Для ВЦН  $\beta_{np} + \beta_{mp} \approx 0,02 - 0,05$  [17].

Серед основних геометричних параметрів, що впливають на к.к.д. нагнітача та визначають форму проточної частини РК, можна виділити відносну ширину колеса  $b_2/D_2$ , відносну ширину лопаток дифузора  $b_3/b_2$ , кількість та профіль лопаток РК, вхідний і вихідний кути лопаток РК  $\beta_{1n}$  та  $\beta_{2n}$ , втулкове відношення  $\bar{D}_{an}$ , відношення діаметрів  $D_1/D_2$ .

Відносна ширина колеса  $b_2/D_2$  має велике значення при проектуванні ВЦН. Для першого РК ВЦН приймають більше значення величини  $b_2/D_2$  порівняно з його наступними РК. Ефективність роботи ступеня ВЦН досягається, якщо  $b_2/D_2 = 0,02 - 0,08$ .

Відносна ширина лопаток дифузора  $b_3/b_2$  впливає на рівень втрат у РК. Оптимальне значення  $b_3/b_2$  залежить від типу коліс та кута натікання в дифузор, на основі дослідів приймається  $b_3/b_2 = 1,2 \div 1,25$  [14]. Для безлопаткового дифузора (БЛД) зниження  $b_3/b_2$  приводить до зниження к.к.д. РК, а для лопаткового дифузора (ЛД) – до підвищення к.к.д.

Кількість та профіль лопаток впливають на рівень економічності та діапазон високих к.к.д. Із збільшенням кількості лопаток росте напір та втрати на тертя. Для збільшення к.к.д. РК лопаткам надають відповідний аеродинамічний профіль, який визначається силами, що виникають внаслідок взаємодії потоку газу та лопаток РК. Для визначення відповідних сил, що діють на лопатки РК, та втрат роботи на стиснення газу використовують теорію Жуковського Н. Е. [15]. Проте через складність задачі, а саме через розрахунок циркуляції газу навколо профіля за реальним розподілом швидкостей, на сьогодні така теорія можлива при

використанні численних припущень, що в свою чергу збільшує похибку визначення втрат роботи в ступені ВЦН.

У роботі [14] вибір кількості лопаток залежить від їхньої оптимальної густоти  $(l/t)_{opt} = 2,5 - 4,0$ . Не існує достатньо достовірного теоретичного критерію для вибору оптимальної кількості лопаток. Дослідження показують, що оптимальною буде така кількість лопаток, за якої середня відстань між ними наближено рівна половині їхньої довжини [27]. Кількість лопаток  $z_{opt}$  можна визначити за емпіричними формулами за значеннями кута  $\beta_{\lambda 2}$ :

– Дена Г. Н. [17]  $z_{opt} \approx 10 \cdot \pi \cdot \sin \beta_{\lambda 2}$ ;

– Анисимова С. А. [28]  $z_{opt} \approx \frac{\beta_{\lambda 2}}{4} + \frac{(105 - \beta_{\lambda 2}) \cdot (\beta_{\lambda 2} - 10)}{200}$ ;

– Степанова А. І. [19]  $z_{2opt} \approx \beta_{\lambda 2} / 3$ ;

– Пфлейдерера [27] та [29]  $z_{2opt} \approx 6,5 \cdot \frac{\frac{D_2}{D_1} + 1}{\frac{D_2}{D_1} - 1} \cdot \sin \frac{\beta_{1\lambda} + \beta_{2\lambda}}{2}$ ;

– Еккерта [15]:  $z_{2opt} = \left( \frac{l}{t_{cp}} \right)_{opt} \cdot \frac{2 \cdot \pi \cdot \sin \frac{\beta_{1\lambda} + \beta_{2\lambda}}{2}}{\ln \frac{D_2}{D_1}}$ ;

де  $l$  – довжина лопатки, м;

$t_{cp}$  – крок за середнім діаметром, м.

Вхідний кут лопаток РК  $\beta_{1\lambda}$  впливає на пологість кривих коефіцієнта напору і на к.к.д. у функції від витрати. Зі збільшенням кута  $\beta_{1\lambda}$  до 40-42° пологість напірної характеристики збільшується так само, як і область високих значень к.к.д., особливо при використанні БЛД.

Вихідний кут лопаток РК  $\beta_{2\lambda}$  забезпечує необхідне значення коефіцієнта напору в ступені, впливає на степінь реактивності ступені та крутизну

характеристики РК. Зі збільшенням  $\beta_{2,1}$  від 22-23° до 45-50° досягається максимальне значення коефіцієнта напору, але одночасно знижується значення к.к.д. та збільшуються втрати на тертя та витікання газу через ущільнення на покривальному диску.

Втулкеве відношення  $\bar{D}_{em} = D_{em} / D_2$  впливає на к.к.д. РК. Чим менший діаметр вала (втулки), тим більш високим стає к.к.д. РК. Ця величина не є параметром оптимізації, проте важливе значення має жорсткість ротора. У жорсткого ротора власна частота коливання ротора менша від частоти обертання, у гнучкого – більша за частоту обертання, що запобігає виникненню резонансу. Зі збільшенням його оптимального значення  $\bar{D}_{em} = 0,25 \div 0,35$  збільшується відносна швидкість на вході ВЦН та відповідно до неї втрати газу.

Для високоефективних РК при  $\bar{D}_{em} \leq 0,25$  характерне відношення діаметрів коліс  $D_1 / D_2 \approx 1 \div 1,02$ , для двоступеневих ВЦН значення  $D_1$  збільшують. Зазвичай  $1,25 < D_1 / D_2 < 3,3$ . Найкращі машини характеризують відношенням  $D_1 / D_2 \approx 1,4 \div 1,6$ .

### 1.3 Аналіз методів ідентифікації та контролю параметрів нагнітачів

Для гарантування надійної експлуатації основного обладнання КС широко використовують методи контролю та ідентифікації основних параметрів ВЦН, що дають можливість виявити пошкодження на початковій стадії їхнього розвитку, оцінити допустимість подальшої експлуатації ВЦН. У зв'язку з цим зростає значення розвитку та вдосконалення методів ідентифікації, що дає змогу, на основі результатів досліджень властивостей технологічних об'єктів, побудувати їхню математичну модель [30-33].

Сьогодні, у результаті відсутності цілісної науково обґрунтованої методичної бази, більшість ідентифікаційних робіт використовують не на стадії проектування та тестування дослідних зразків ГПА, а безпосередньо під час його експлуатації. Також існує проблема реалізації методів ідентифікації. Для того щоб ідентифікувати параметри об'єкта керування, необхідно у найбільш інформативних місцях



вмонтувати давачі. Але в існуючому обладнанні, згідно з чинними нормами і технічним завданням, вже вмонтовані давачі. Устаткування нових давачів проблематичне, оскільки потрібно модернізувати обладнання та переоформити відповідну технічну документацію. [34-35].

Спектр методів ідентифікації параметрів математичних моделей є дуже широким і різноманітним, тому вибір оптимального з них у кожному конкретному випадку визначається об'єктом моделювання, а також ресурсами, що є у розпорядженні суб'єкта ідентифікації. Зауважимо, що при виборі методу ідентифікації враховують можливість:

- постановки на фізичних моделях необхідних експериментів з прогнозованою точністю, які не можливо реалізувати з різних причин на самому об'єкті дослідження;
- використання для корегування результатів дослідів, отриманих на об'єкті моделювання під час перевірки адекватності моделі.

Усі методи ідентифікації та контролю параметрів основного обладнання КС умовно можна поділити на дві категорії: методи, основані на обробленні сигналів (рис. 1.2) та методи, основані на побудові моделей (рис. 1.3). Методи, основані на обробленні сигналів, мають меншу надійність, оскільки на сигнали системи впливають зміни експлуатаційних умов, що приводить до змін вхідних величин системи чи збурень.

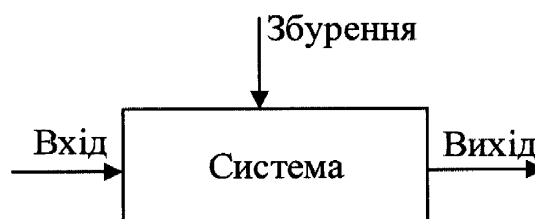


Рис. 1.2. Функціональна схема методу, основаного на обробленні сигналів

За класифікацією, наведеною в роботі [33] ці методи можна віднести до першого, другого, третього покоління ідентифікаційних систем, що передбачають

використання різних приладів реєстрування та контролю. Параметри ідентифікації та контролю об'єктів керування реалізуються у відповідних регуляторах роботи обладнання та технологічного процесу.

Методи, основані на побудові моделей (рис. 1.3), базуються на виникненні змін між виміряними та прогнозованими виходами. Їх можна віднести до четвертого та п'ятого поколінь ідентифікаційних систем, основними функціями яких є ідентифікація параметрів обладнання, що попереджують певні його несправності, та керування оптимізацією роботи основного обладнання за їхніми ідентифікаційними оцінками. В ідеальному випадку причинами змін між змодельованими та реальними виходами є лише пошкодження, а не зміни в умовах функціонування, виникнення збурень та ін. Якщо система «здорова», то зміни наближені до білого шуму, а будь-які відхилення від нього можна пояснити як виникнення пошкодження в системі [36].



Рис. 1.3. Функціональна схема методу, що оснований на побудові моделі

Для попередження відмов на КС-39 Богородчанського лінійного виробничого управління магістральними газопроводами (ЛВУМГ) «Прикарпаттрансгаз» контролюють такі техніко-економічні параметри ЕГПА-25РЧ [37]:

- коефіцієнт технічного стану нагнітача за політропним к.к.д.  $k_n$ ;
- коефіцієнт завантаження електродвигуна на експлуатаційному режимі  $k_u$ ;
- к.к.д. електродвигуна на експлуатаційному режимі  $\eta_e$ ;
- ступінь підвищення тиску газу  $\varepsilon$ ;

- політропний к.к.д. нагнітача  $\eta_{пол}$ ;
- коефіцієнт технічного стану нагнітача за ступенем підвищення тиску  $k_\varepsilon$ ;
- коефіцієнт режиму роботи нагнітача  $k_{реж}$ ;
- приведену об'ємну продуктивність нагнітача  $Q_{vnp}$ .

Використовуючи зазначені вище параметри, будують залежності політропного к.к.д. від приведеної об'ємної продуктивності  $\eta_{пол} = f(Q_{vnp})$  та ступеня підвищення тиску газу від приведеної продуктивності перед нагнітачем  $\varepsilon = f(Q_{vnp})$ , за якими визначають технічний стан агрегату ЕГПА-25РЧ.

Даний метод є зручний для експлуатаційних умов, але прийняті для побудови теплотехнічних характеристик передумови в деяких випадках призводять до істотних похибок при визначенні внутрішньої потужності та об'ємної продуктивності ВЦН.

Серед основних параметрів вібрації, що підлягають контролю, можна виділити:

- віброшвидкість;
- віброзміщення;
- віброприскорення.

Ці параметри вимірюють у контрольних точках за трьома взаємно-перпендикулярними напрямками згідно з рекомендаціями, зазначеними в праці [1]. За граничними значеннями параметрів вібрації ГПА оцінюють вібраційний стан ГПА як «Добре», «Прийнято», «Допустимо», «Недопустимо». Недоліком цього методу є наявність пружних і демпферних елементів в опорах роторів, що заважає вчасно виявити дефекти, а також складність ідентифікації вібропараметрів [38-39].

Слід окремо виділити метод віброакустичного контролю вільних коливань, який є найбільш ефективним для виявлення тріщиноподібних пошкоджень лопаток, оскільки акустичні коливання, що генеруються лопатковим апаратом у процесі пуску та експлуатації, є найбільш інформативними. Принцип застосування

цього методу наведений у працях Бурау Н. І., Заміховського Л. М. та інших [40-42]. В основу цього методу покладено створення та вимірювання вільних згасальних гнучких коливань об'єкта, причому для оброблення отриманої інформації автори пропонують використання спектрального аналізу, частотно-часового аналізу, вейвлет-фільтрацію, а для розпізнавання пошкоджень використовують нейронні мережі.

У роботі [43] використовують метод статистичного аналізу вібраційних сигналів з використанням силового розділення джерел, в якому будується ймовірнісна модель вібраційних сигналів у вигляді періодично корельованих випадкових процесів. Завдяки цьому методу можна виявити дефекти на ранній стадії їхнього розвитку, проте не зазначено кількість необхідних компонентів, порядок фільтрів та статистичну точність розділення джерел.

Автори статті [44] дослідили зв'язок між основними параметрами ВЦН та його вібраційними сигналами, виконавши ряд експериментів на дослідній установці. Результати всіх тестів показали, що рівень вібрації збільшується зі збільшенням витрати та наявністю відповідного дефекту, проте для ідентифікації пошкоджень потрібна масштабніша дослідницька робота.

У роботах Marczyk та інших [45-50] автори описують новий метод для знаходження та ізоляції пошкоджень, який ґрунтується на ідентифікації складності системи. Загалом складність системи визначають як кількість інформації, яку потрібно описати. Складність пов'язана з кількістю бітів, необхідних для опису відповідного стану:

$$I = \log_2(\Omega), \quad (1.11)$$

де  $\Omega$  – кількість станів системи.

Складність визначають як функцію топології та ентропії системи:

$$C = f(\tau, E), \quad (1.12)$$

де  $\tau$  – топологія системи, що відображає її структуру та враховує зв'язки між змінними та їхніми кореляціями.

$E$  – енторопія системи, що включає невизначеність системи та визначається як ентропія Шеннона [45]:

$$E = -\sum_{c=i}^n p_i \cdot \log p_i, \quad (1.13)$$

де  $p_i$  – функція масової ймовірності.

Перевагою цього методу є можливість отримання цілісної інформації про стан системи шляхом оброблення великого масиву даних. Ефективність даного методу підтверджується виконаними дослідженнями, проте не вказана похибка даного методу, а також вплив кожного вимірювального сигналу на загальну виміряну складність.

На сьогодні найбільш поширені нові методи ідентифікації та контролю параметрів ГПА – аеротермоакустичні методи. Їх основоположником є Козирьов В. Т., який у своїй роботі [51] розглядає газотурбінний двигун (ГТД) як систему, що включає дві підсистеми (механічну та аеротермоакустичну), що взаємодіють між собою. При виконанні проектування ГТД має бути відсутність сильної енергетичної взаємодії (резонансів) між механічними та аеротермоакустичними підсистемами ГТД. Згідно з теорією Гельмгольца акустична система ГТД складається з чотирьох парціальних акустичних систем, на основі яких будується математична модель об'єкта. Цей метод має високу точність, яка перевірена відповідними дослідженнями, проте потребує дорогої апаратури та підтвердження його ефективності для всіх типів ГПА.

Досить часто на практиці здійснюють контроль не основних параметрів роботи ГПА, а відхилень від їхніх паспортних значень [52-55]. Дані параметри носять назву ідентифікаційних ознак, за розбиттям простору яких визначають розпізнавання технічних станів ГПА: справний, несправний, працездатний, непрацездатний, функціонувальний, нефункціонувальний. Тому в сукупності з методами ідентифікації параметрів ВЦН доцільно використовувати методи кластеризації даних параметрів,

основаних на комп'ютерних технологіях: штучні нейромережі, нечіткі системи, вейвлет-перетворення та генетичні алгоритми.

Методи ідентифікації параметрів ВЦН природного газу з використанням нейромережевого підходу запропоновані в роботах [55-56]. Наведені методи загалом збільшують ефективність роботи ВЦН, зменшують затрати на його експлуатацію, але одночасно мають низьку точність ідентифікації дефектів, малу швидкість збіжності, розв'язок збігається з локальним оптимальним рішенням. Поєднання кількох методів дозволяє ефективніше ідентифікувати параметри нагнітача. Тому автор статті [52] пропонує використання імунного генетичного алгоритму оптимізації моделі з використанням вейвлетових перетворень та нейромереж. Цей алгоритм визначається структурною стабільністю, властивістю глобального пошуку, великою швидкістю збіжності та високою точністю, що складає 99 %.

Ефективність методів параметричної ідентифікації визначається не лише якістю функціональних алгоритмів, але і якістю технічних засобів. Автори [57-59] підкреслюють, що для визначення втрат продуктивності ВЦН потрібно врахувати похибки вимірювального обладнання, проаналізувати склад газу та зібрати дані за стабільної умови роботи компресора (коли температури на вході і на виході не змінюються більше як на 1 °С протягом 3-5 хв).

Проте в основному ефективність методів параметричної ідентифікації параметрів ВЦН залежить від точності обчислення його фактичних характеристик та порівняння їх із його базовими характеристиками. Автори роботи [60] пропонують нову технологію визначення фактичних характеристик, що базується на проведенні періодичних теплотехнічних випробувань. Фактичні характеристики і параметри ГПА визначено шляхом обчислення зсуву в багатопараметричному просторі станів, що зумовлене вимірюваними параметрами фактичних характеристик відносно паспортних відповідно до значень узагальнених нормованих дефектів проточних частин ВЦН. Види узагальнених дефектів ВЦН виявлено шляхом мінімізації середньоквадратичних відхилень значень узагальнених дефектів за серіями вимірів, що містять дані про параметри агрегатних і цехових автоматик від початку

міжремонтного періоду. Проте в даній роботі не вказано точність описаної технології визначення фактичних характеристик вимірюваних параметрів.

Оскільки основні втрати виникають у проточній частині ВЦН [9-20], Ільченко Б. С. у своїй монографії [14] описує метод газодинамічного розрахунку проточної частини, на основі якого визначено такі параметри як коефіцієнти втрат у РК та ЛД. Із використанням даних коефіцієнтів визначено зазор в ущільненні покривального диска та обчислено фактичні характеристики ВЦН за його вимірюваними параметрами. Розрахунок фактичних характеристик ВЦН запропонованим методом дозволяє з достатньою точністю врахувати вплив зношення на фактичні параметри режиму нагнітача для всього діапазону робочих навантажень. Проте в даній роботі не наведена математична модель ВЦН, яка б разом із автоматизованими системами контролю забезпечила високу ефективність методів ідентифікації та контролю параметрів ВЦН природного газу.

#### **1.4 Математичні моделі нагнітачів природного газу**

Відцентровий нагнітач природного газу можна розглядати як динамічну систему, що характеризується сукупністю параметрів, які визначають наявність відповідних множин технічних станів нагнітачів. Розпізнавання та прогнозування технічного стану ВЦН здійснюється за допомогою формального опису простору технічних станів нагнітача, який складається із сукупності вхідних та вихідних параметрів ВЦН. Цей формальний опис називається математичною моделлю, що базується на відповідних законах збереження кількості руху, збереження маси (рівняння нерозривності), збереження моменту кількості руху і збереження енергії газових потоків. При побудові математичної моделі ВЦН потрібно врахувати вплив випадкових та передбачуваних процесів (процесів старіння, зношування, вплив зовнішніх умов та інше), що характеризують зміну технічного стану [61-65].

Термогазодинамічні параметри (температура, тиск та ін.) та вихідні параметри ВЦН (продуктивність, політропний к.к.д., ступінь стиснення) в різних перерізах проточної частини є носіями інформації про технічний стан ВЦН. Поява будь-якого

дефекту в проточній частині ВЦН пов'язана зі зміною геометричних розмірів тих чи інших деталей проточної частини, що приводить до відповідної зміни характеристик вузлів ВЦН та його термогазодинамічних параметрів. Тому термогазодинамічні та геометричні параметри можна використовувати для побудови математичних моделей ВЦН із врахуванням основних вимог (рис. 1.4). Серед них можна виділити адекватність математичної моделі (модель достатньо точно описує робочий процес у проточній частині ВЦН), універсальність моделі (можна використовувати для широкого кола задач), можливість реалізації даної моделі на електронно обчислювальній машині (ЕОМ), повнота і доступність вихідних даних, повнота визначення фізичних процесів, що проходять у досліджуваних системах [66-67].

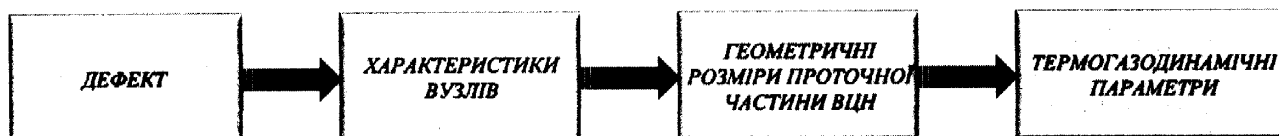


Рис. 1.4. Схема передачі інформації про технічний стан ВЦН

Математичний опис досліджуваного об'єкта можна отримати у різному вигляді. При цьому характеристики моделі мають максимально відповідати аналогічним характеристикам об'єкта. Однак використання у реальних системах надто складних математичних моделей позбавляє їх гнучкості та універсальності, утруднює їхнє застосування. У зв'язку з цим, вибір моделі того чи іншого класу зумовлений не лише апріорними відомостями про структуру досліджуваного об'єкта, режимами його функціонування, але й необхідною мірою точності відповідності моделі реальному об'єкту і складністю реалізації отриманого рішення.

Сьогодні відомі три шляхи збільшення точності математичних моделей [67]:

- перший метод полягає в старанному і точному, експериментальному та теоретичному дослідженні робочого процесу ВЦН з його математичним описом. Такий метод поступово вдосконалює всі існуючі методи розрахунку;



- другий метод полягає в ідентифікації математичних моделей за результатами досліджень. При ідентифікації визначають лише окремі коефіцієнти моделі (коефіцієнти втрат чи поправні коефіцієнти в емпіричних моделях, що описують зміну втрат);
- третій метод полягає в ідентифікації діючої моделі за результатами розрахунку, який був виконаний на більш точній і складній моделі, але яка є не зручною для використання.

Однозначність вивлення пошкоджень ВЦН визначається точністю вимірювання термогазодинамічних параметрів, тому для підвищення ефективності певного методу ідентифікації параметрів ВЦН автори [68] рекомендують виявити місце локалізації дефекту, визначити внутрішні причини появи основних ознак дефектного стану.

За зміною основних вихідних параметрів ВЦН визначають інтегральний вплив всієї множини наявних несправностей на його функціонування. За рекомендаціями [1] для виявлення несправностей нагнітачів використовується коефіцієнт технічного стану ВЦН за політропним к.к.д.:

$$K_{\eta_{пол}} = \frac{\sum_{i=1}^s \eta_{пол}^i \cdot \eta_{пол\ б}^i}{\sum_{i=1}^s (\eta_{пол\ б}^i)^2} = \frac{\sum_{i=1}^s \eta_{пол}^i \cdot f_{\delta}(Q_{vnp}^i)}{\sum_{i=1}^s (f_{\delta}(Q_{vnp}^i))^2}, \quad (1.14)$$

де  $\eta_{пол}^i$  – фактичне значення політропного к.к.д. ВЦН на  $i$ -му контрольному режимі;

$\eta_{пол\ б}^i = f_{\delta}(Q_{vnp}^i)$  – значення політропного к.к.д. на його базовій характеристиці за приведеною об'ємною продуктивністю  $Q_{vnp}^i$ , отриманого на  $i$ -му контрольному режимі;

$s$  – кількість контрольних режимів.

На практиці для ідентифікації несправностей нагнітачів найчастіше використовують їхні зведені характеристики – залежності зведеної внутрішньої потужності  $\left[ \frac{N_i}{\rho_{ак}} \right]_{зв}$ , політропного к.к.д.  $\eta_{пол}$  та ступеня підвищення тиску  $\varepsilon$  від

зведеної об'ємної подачі газу  $Q_{zg}$ . Отже, виводиться однопараметрична термогазодинамічна модель нагнітача, яка показує тренд зміни основних термогазодинамічних характеристик, що дає можливість виявити несправності двигуна на ранній стадії їхнього розвитку. Для оцінювання «зсуву» характеристик, у термодинамічну модель вводять коефіцієнти, використовувані як коефіцієнти технічного стану нагнітача. Ці коефіцієнти визначають відношенням відповідних фактичних параметрів до їхніх паспортних значень за постійного значення обраної незалежної змінної. Фактичні характеристики ГПА визначають у результаті проведення теплотехнічних випробувань ВЦН.

Наведені термогазодинамічні моделі зручні для експлуатаційних умов, але прийняті для їхньої побудови передумови (неврахування реальних робочих умов експлуатації ВЦН, складу газу, реального технічного стану ВЦН тощо) в деяких випадках призводять до істотних похибок при визначенні потужності, яку споживає нагнітач, і витрат паливного газу.

### **1.5 Вибір і обґрунтування напряму досліджень**

Основним напрямом розвитку вітчизняної промисловості є розвиток нових і вдосконалення вже існуючих методів контролю та ідентифікації параметрів основного обладнання ГТС для зменшення собівартості проведення планово-попереджувальних ремонтів і підвищення продуктивності основних агрегатів КС. Основні методи ідентифікації та контролю параметрів нагнітачів викладені в працях [27-60], більшість із яких реалізуються під час експлуатації ВЦН та передбачають монтування додаткових давачів, що, у свою чергу, є проблематичним, оскільки потрібна модернізація обладнання та переоформлення відповідної технічної документації.

На сьогодні компресорний парк газопроводів України майже повністю складається з відцентрових нагнітачів, основні властивості яких пов'язані із їхніми геометричними параметрами. Питанню впливу геометричних параметрів проточної частини нагнітачів на їхню роботу та обчисленню втрат в їхніх елементах присвячена значна кількість публікацій як зарубіжних, так і вітчизняних авторів [9-23], які, в

основному, використовують дослідження Еккерта, К. Пфлейдерера, А. Степанова, В. Траупеля. Вони проводять газодинамічний розрахунок проточної частини ВЦН на основі експериментальних даних, розраховують коефіцієнти втрат у РК та ЛД і визначають вплив окремих параметрів проточної частини ВЦН на політропний к.к.д. та форму його теплотехнічних характеристик. Проте в цих роботах не наведений метод визначення зміни геометричних та технологічних параметрів ВЦН від значень, що відповідають умовам роботи нового нагнітача або після його КР, що дає змогу оцінити технічний стан проточної частини нагнітача. Також немає математичної моделі ВЦН, яка із існуючими САК КС змогла б краще забезпечити контроль параметрів агрегату в умовах його експлуатації.

У працях Горбійчука М. І. та Скріпки О. А. [8, 23] отримана математична модель відцентрового нагнітача із рівняння енергетичного балансу. Порівняно з математичною моделлю Грудза В. Я. та ін. [69] отримана модель враховує втрати на витоки газу і тертя дисків, проте призначена для одноступеневого ВЦН. Оскільки більшість нагнітачів, які постачає промисловість в останні роки, мають два ступені [1], то метою дисертаційної роботи є розроблення методу контролю параметрів двоступеневого ВЦН із використанням його математичної моделі, яка б виражала залежність продуктивності нагнітача природного газу від його технологічних та геометричних параметрів із врахуванням втрат на витоки газу і тертя дисків.

Виходячи із зазначеного вище поставлено завдання розроблення та інтеграції до складу існуючої САК ГПА системи контролю параметрів двоступеневого відцентрового нагнітача природного газу, яка разом із відповідною математичною моделлю ВЦН забезпечить оцінювання функціонального стану проточної частини агрегату в умовах його експлуатації, що, в свою чергу, дозволить простежити за появою і розвитком поступових відмов, визначити інтенсивність їхнього розвитку.

## РОЗДІЛ 2

### ТЕОРЕТИЧНІ ЗАСАДИ МЕТОДІВ ІДЕНТИФІКАЦІЇ ТА КОНТРОЛЮ ПАРАМЕТРІВ ДВОСТУПЕНЕВОГО ВЦН ПРИРОДНОГО ГАЗУ

#### 2.1 Математична модель двоступеневого ВЦН природного газу

У різних елементах ГПА відбуваються принципово різні за своєю природою технологічні процеси. Тому для їхнього моделювання використовують різні методи математичного апарату. Основними вимогами, висунутими для отриманих форм математичних моделей, є вимоги можливості реалізації цих моделей та адекватний опис розрахунковою моделлю функціонального поведіння елемента системи в умовах реальної експлуатації [3].

Сьогодні для вирішення задачі ефективної експлуатації ГПА досліджують роботу кожного його елемента зокрема без врахування їхнього взаємного впливу. Такий підхід пояснюється тим, що кожний елемент ГПА має свій власний критерій ефективності, кожний завод-постачальник відповідає за постачання та сервісне обслуговування свого обладнання. Також діагностичне обслуговування кожного елемента ГПА виконується роздільно без врахування взаємного впливу його складових елементів [59].

Автори праці [3] рекомендують зводити різні за формою математичні моделі елементів ГПА, щоб одержати математичну модель ГПА загалом. Як відомо, збільшення втрат газу у проточній частині ВЦН призведе до втрат енергії на компримування газу, які, у свою чергу, визначаються технічним станом приводу нагнітача. Дослідженням енергетичної потужності приводу нагнітача присвячено ряд робіт, серед яких слід виділити дослідження Поршакова Б. П., Яковліва Е. І., Грудза В. Я, Заміховського Л. М., де побудовано математичні моделі елементів ГПА, що дозволяє оцінити їхній функціональний стан та визначити значення ефективної потужності [70-73]. Тому для визначення потреби в енергії ГПА

доцільно застосувати вже існуючі моделі. Метою цього дослідження є визначення енерговтрат суто в проточній частині нагнітача природного газу.

Більшість КС України використовує двоступеневі нагнітачі природного газу, а наведені математичні моделі в працях [23, 69, 74, 75] призначені для нагнітачів із одним ступенем стиснення газу. Тому актуальною є побудова математичної моделі двоступеневого ВЦН із врахуванням геометричних параметрів його проточної частини та втрат на витоки газу і тертя дисків.

Геометричні параметри ВЦН істотно впливають на його теплотехнічні характеристики. У результаті зношення основних елементів проточної частини ВЦН відбувається зміна його фактичних характеристик стосовно паспортних. Характерними несправностями проточної частини ВЦН є:

- ерозійне зношення вхідних направляючих апаратів, лопаток і робочих коліс ЛД і БЛД;
- збільшення зазорів в ущільненнях покривального диску.

Причиною ерозійного зношення є наявність в потоці газу рідких чи твердих частинок, які під час зіткнення з поверхнями елементів проточної частини ВЦН спричиняють їхнє поверхневе пошкодження. Проте експериментальні дослідження, наведені в працях [14, 76], підтверджують слабкий вплив ерозійного зношення на політропний к.к.д. ВЦН, оскільки робочі колеса нагнітачів виходять з ладу до того, як ступінь ерозійного зношення лопаткового апарату РК ВЦН досягне рівня, що істотно знижує політропний к.к.д.

Найбільший вплив на політропний к.к.д. нагнітача має збільшення зазорів в ущільненнях покривального диску внаслідок руйнування ущільнювальних вусиків під час зачіпання їх об ротор. Такі зачіпання характерні для режимів пусків і зупинок, підвищеного рівня вібрації. Збільшення зазорів внаслідок ерозійного зношення незначне. Результати досліджень показали, що збільшення радіального зазору в ущільненні покривального диска на 1 мм, за номінального значення 0,5-1 мм, приводить до зниження к.к.д. у середньому на 1,1-1,4 % [14].

Серед основних геометричних параметрів проточної частини ВЦН можна виділити ширину лопаток колеса на вході і на виході із ступені  $b_1$  та  $b_2$ , внутрішній та зовнішній діаметри РК  $D_1$  та  $D_2$ , кількість лопаток РК  $z_s$  та їхня товщина  $\delta_m$ , вхідний і вихідний кути лопаток РК  $\beta_{1,l}$  та  $\beta_{2,l}$ , геометричні характеристики ущільнень покривального диску (діаметр ущільнення  $D_{si}$ , радіальний зазор  $s_r$ , кількість ущільнень  $Z_{sr}$ ). На рисунку 2.1 показані основні елементи проточної частини двоступеневого ВЦН типу 650-21-2 [77]. Для запобігання витікання газу із порожнин проточної частини з високим тиском у порожнини з меншим тиском у конструкції ВЦН 650-21-2 передбачені ущільнення 1, 2. Конструкція ущільнень ВЦН 650-21-2 зображена на рисунку 2.2.

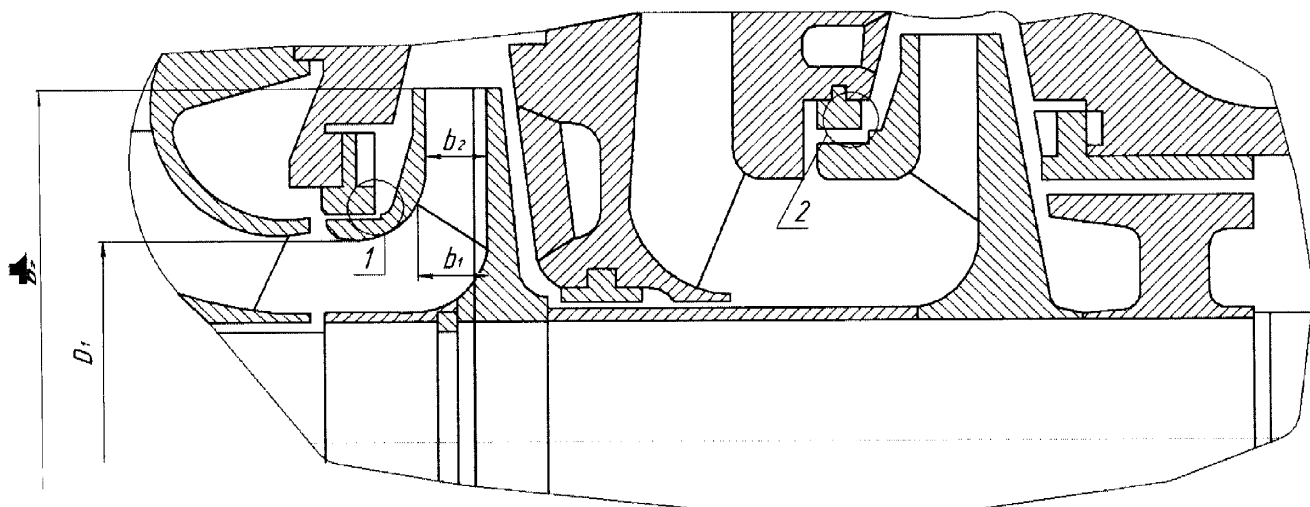


Рис. 2.1. Схема проточної частини ВЦН 650-21-2 [77]

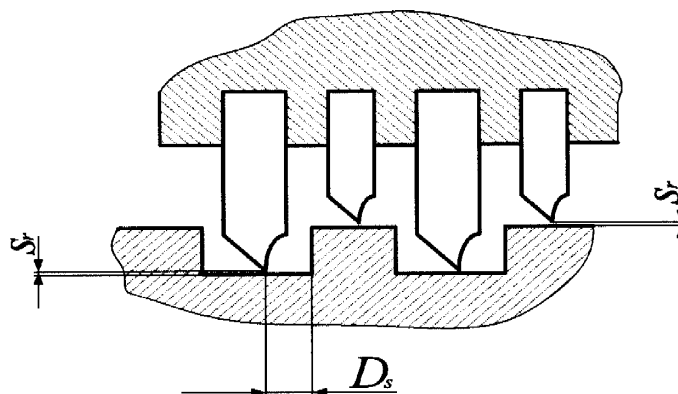


Рис. 2.2. Зазори в ущільненнях проточної частини ВЦН 650-21-2 [77]

На рисунку 2.3 показані паралелограми швидкостей на лопатці ВЦН, що показують розподіл швидкостей на вході та виході міжлопаткового каналу в точках 1 та 2 [11].

Використане таке позначення незалежних швидкостей:  $c$  – абсолютна швидкість, що існує в нерухомих елементах РК;  $w$  – відносна швидкість газового потоку в середині міжлопаткового каналу;  $u$  – колова швидкість.

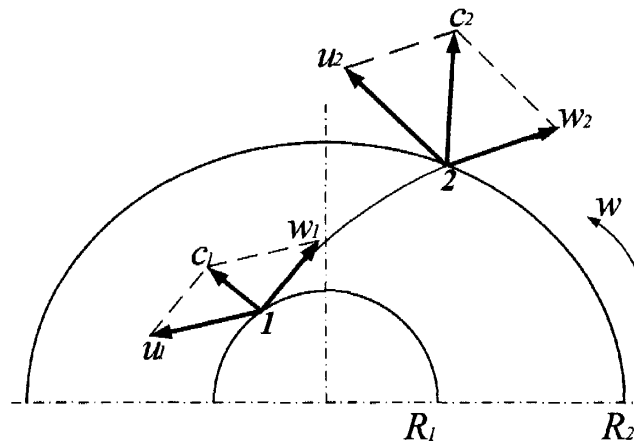


Рис. 2.3 Паралелограми швидкостей на лопатці ВЦН [11]

У теорії нагнітачів замість паралелограмів швидкостей використовують трикутники швидкостей [11] на вході та виході РК ВЦН (рис. 2.4).

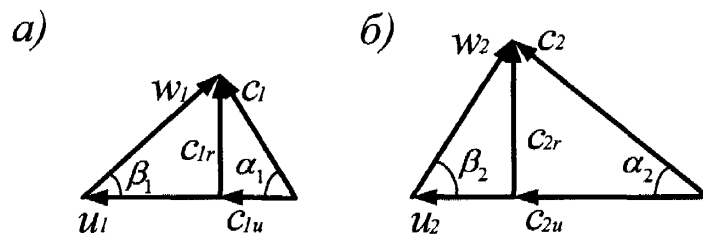


Рис. 2.4 Трикутники швидкостей: а – вхідний; б – вихідний [11]

Елементи трикутників швидкостей:

- $c_u$  – колова (тангенціальна) складова абсолютної швидкості;
- $c_r$  – радіальна складова абсолютної швидкості (радіальна швидкість);
- $\beta_1$  і  $\beta_2$  – вхідний і вихідний лопаткові кути робочих коліс;

-  $\alpha_1$  і  $\alpha_2$  – вхідний і вихідний розрахункові робочі кути робочих коліс.

Запишемо рівняння енергетичного балансу для першої ступені. Припустимо, що протягом руху газу через ВЦН теплообмін з навколишнім середовищем відсутній. Тоді [78]:

$$Q_2 P_2 = Q_1 P_1 + G g h_1, \quad (2.1)$$

де  $Q_i$ ,  $i=1,2$  – об'ємна продуктивність нагнітача, м<sup>3</sup>/с;

$P_i$ ,  $i=1,2$  – тиск природного газу, Па;

$G$  – масова продуктивність нагнітача, кг/с;

$h_1$  – повний напір першої ступені нагнітача, м.

Індекс "1" характеризує технологічні параметри, що відповідають умовам входу газу в нагнітач, а індекс "2" – технологічні параметри, що відповідають умовам виходу газу із першої ступені.

Тиск природного газу  $P_i$ ,  $i=1,2$  можна розрахувати за такою формулою [37]

$$P_i = P_{ин} + 1,33 \cdot 10^{-4} \cdot P_a,$$

де  $P_{ин}$   $i=1,2$  – надлишкові тиски газу, МПа.

Аналогічне рівняння енергетичного балансу запишемо і для другої ступені нагнітання [78]

$$Q_3 P_3 = Q_2 P_2 + G g h_2, \quad (2.2)$$

де  $Q_3$  – об'ємна продуктивність нагнітача, м<sup>3</sup>/с;

$P_3$  – тиск на виході другої ступені, Па;

$h_2$  – повний напір другої ступені нагнітача, м.

Індекс "3" характеризує технологічні параметри, що відповідають умовам виходу газу із другої ступені ВЦН.

Вилучивши із рівнянь (2.1) і (2.2) добуток  $Q_2 P_2$ , отримаємо такий результат:

$$Q_3 P_3 = Q_1 P_1 + G g h, \quad (2.3)$$

де  $h = h_1 + h_2$  – повний напір нагнітача, м.



Після ділення рівняння (2.3) на  $Q_3$  та з урахуванням того, що  $G_1 = Q_1 \rho_1$  і  $G_3 = Q_3 \rho_3$ , а  $G_1 = G_3 = G$  це рівняння набуде такого вигляду:

$$P_3 = k_v P_1 + \rho_3 g h, \quad (2.4)$$

де  $k_v = \frac{\rho_3}{\rho_1}$  – поправка на стиснення газу [37];

$\rho_i, i = 1, 3$  – густина газу, індекс «1» належить до умов входу газу у першу ступінь ВЦН, а індекс «3» – до умов виходу газу із другої ступені ВЦН, кг/м<sup>3</sup>.

Оскільки  $Q_1 \rho_1 = Q_2 \rho_2$ , де  $\rho_2$  – густина газу, що належить до умов входу газу у другу ступінь ВЦН, то

$$\frac{Q_1}{Q_3} = \frac{\rho_3}{\rho_1} = k_v.$$

Поділивши рівняння (2.4) на  $P_3$ , отримуємо

$$\frac{P_3}{P_1} = \frac{Q_1}{Q_3} + \frac{\rho_3}{P_1} g h. \quad (2.5)$$

Із рівності  $Q_1 \rho_1 = Q_3 \rho_3$  визначимо  $\rho_3 = \rho_1 \frac{Q_1}{Q_3} = \rho_1 k_v$ . Оскільки ступінь підвищення тиску  $\varepsilon = \frac{P_3}{P_1}$ , то, підставляючи  $\rho_3$  у рівняння (2.5), отримаємо

$$\varepsilon = k_v \left( 1 + \frac{\rho_1}{P_1} g h \right). \quad (2.6)$$

Із рівняння стану природного газу, яке запишемо до умов всмоктування [37]

$$\frac{P_1}{\rho_1} = z_1 R T_1,$$

де  $z_1$  – коефіцієнт стиску газу;

$R$  – газова стала, Дж/(кг·К);

$T_1$  – температура газу на вході в нагнітач, К.

Визначимо

$$\frac{\rho_1}{P_1} = \frac{1}{z_1 R T_1}.$$

Останній результат дає можливість формулу (2.6) записати в такому вигляді:

$$\varepsilon = k_v \left( 1 + \frac{1}{z_1 R T_1} g h \right). \quad (2.7)$$

Як правило, газ до лопаток колеса першої ступені підводиться у радіальному напрямку. Тому тангенсна складова абсолютної швидкості  $c_{u1}$  дорівнює нулю і для нагнітача запишемо формулу [15]

$$h_{e1} = \frac{\Phi_{u2}^{(1)}}{g} u_2^{(1)2}, \quad (2.8)$$

де  $h_{e1}$  – напір за Ейлером для першого колеса, м;

$\Phi_{u2}^{(1)}$  – коефіцієнт закручування віднесений до виходу першої ступені;

$u_2^{(1)}$  – колова швидкість віднесена до виходу першого РК ВЦН, м/с.

Відповідно до формули Ейлера робота, що витрачається на переміщення одного кілограма газу через друге колесо нагнітача [15]

$$h_{e2} = \frac{1}{g} \left( \Phi_{u2}^{(2)} u_2^{(2)2} - \Phi_{u1}^{(2)} u_1^{(2)2} \right), \quad (2.9)$$

де  $h_{e2}$  – напір за Ейлером для другого колеса, м;

$\Phi_{u2}^{(2)}$  – коефіцієнт закручування, віднесений до виходу другої ступені;

$\Phi_{u1}^{(2)}$  – коефіцієнт закручування, віднесений до входу другої ступені;

$u_1^{(2)}$ ,  $u_2^{(2)}$  – колові швидкості, віднесені до входу і виходу другого відцентрового колеса, м/с.

Оскільки повний напір нагнітача дорівнює сумі напорів  $h_{e1}$ , і  $h_{e2}$ , то [79]

$$h = h_{e1} + h_{e2}.$$

З урахуванням формул (2.8) і (2.9) матимемо

$$h_e = \frac{\Phi_{u2}^{(1)} u_2^{(1)2} + \Phi_{u2}^{(2)} u_2^{(2)2} - \Phi_{u1}^{(2)} u_1^{(2)2}}{g}. \quad (2.10)$$

Величина  $h_e$  не враховує, між іншим, витікання газу через ущільнення в кількості  $\frac{G_{np}}{G}$ , що збільшує роботу стиску до  $\left(1 + \frac{G_{np}}{G}\right) h_e g$ , а також втрати на тертя бічних поверхонь колеса в середовищі газу. Якщо ці втрати для даного нагнітача складають  $N_{TP}$ ,  $Bm$ , то повна робота, витрачена на стиснення одного кілограма газу [15]

$$hg = \left(1 + \frac{G_{np}}{G}\right) h_e g + \frac{N_{TP}}{G}. \quad (2.11)$$

Втрати на витікання газу через ущільнення розраховують за формулою Стодоли (1.2). Якщо  $D_{si}$  – діаметр ущільнення,  $s_i$  – радіальний зазор,  $Z_{si}$  – кількість ущільнень,  $\Delta P_i$  – перепад тиску, а  $\rho_{ci}$  – середня густина газу в  $i$ -му ущільненні, то

$$G_{np}^{(i)} = \alpha_i \pi s_i D_{si} \rho_{ci} \sqrt{\frac{2\Delta P_i}{Z_{si} \rho_{ci}}}, \quad (2.12)$$

де  $\alpha_i$ ,  $i = 1, 2$  – коефіцієнт витрати, який залежить від конструкції ущільнення, індекс «1» належить до параметрів першого колеса, а індекс «2» – до другого колеса.

Відношення величин  $\frac{\Delta P_i}{\rho_{ci}}$  розраховують за формулою Степанова (1.5).

Тангенційні складові абсолютних швидкостей  $u_1^{(i)}$  і  $u_2^{(i)}$  газу на вході і виході  $i$ -го ( $i = 1, 2$ ) колеса нагнітача виразимо через конструктивні параметри  $i$ -го колеса [15]

$$u_1^{(i)} = \omega R_1^{(i)}, \quad u_2^{(i)} = \omega R_2^{(i)}, \quad (2.13)$$

де  $R_1^{(i)}$ ,  $R_2^{(i)}$  – внутрішній та зовнішній радіуси  $i$ -го робочого колеса, м;

$\omega$  – кутова швидкість ротора нагнітача.

З урахуванням співвідношень (1.5) і (2.13), формула (2.12) набуде такого вигляду:

$$G_{np}^{(i)} = 0,5 \alpha_i \pi s_i D_{si} \rho_{ci} \omega \sqrt{\frac{3}{Z_{si}} (R_2^{(i)2} - R_1^{(i)2})}, \quad i = 1, 2.$$

Введемо таке позначення:  $K_{np}^{(i)} = 0,5 \alpha_i \pi s_i D_{si} \omega \sqrt{\frac{3}{Z_{si}} (R_2^{(i)2} - R_1^{(i)2})}$   $i = 1, 2$ .

Тоді

$$G_{np}^{(i)} = K_{np}^{(i)} \rho_{ci} \omega. \quad (2.14)$$

Оскільки значення коефіцієнта витрати  $\alpha_i$  визначається лише конструкцією  $i$ -го колеса [15], то коефіцієнт  $K_{np}^{(i)}$  залежить тільки від його геометричних параметрів.

Загальні витікання газу  $G_{np}$  через ущільнення обчислемо як суму витоків газу через ущільнення першого і другого колеса [80]

$$G_{np} = G_{np}^{(1)} + G_{np}^{(2)}.$$

З урахуванням значень  $G_{np}^{(i)}$ ,  $i = 1, 2$ , визначених формулою (2.14), матимемо:

$$G_{np} = \left( K_{np}^{(1)} \rho_{c1} + K_{np}^{(2)} \rho_{c2} \right) \omega. \quad (2.15)$$

Тепер значення  $\frac{G_{np}}{G}$ , що входить до формули (2.11) буде таким:

$$\frac{G_{np}}{G} = \frac{\left( K_{np}^{(1)} \rho_{c1} + K_{np}^{(2)} \rho_{c2} \right) \omega}{G},$$

$$\text{де } \rho_{c1} = \frac{\rho_1 + \rho_2}{2}; \quad \rho_{c2} = \frac{\rho_2 + \rho_3}{2}.$$

У більшості випадків для двоступеневих нагнітачів –  $R_1^{(1)} = R_1^{(2)} = R_1$ ,  $R_2^{(1)} = R_2^{(2)} = R_2$ ;  $D_{s1} = D_{s2} = D_s$ ;  $Z_{s1} = Z_{s2} = Z_s$  [80]. Оскільки геометричні розміри ущільнень однакові, то припускаємо, що  $\alpha_1 = \alpha_2 = \alpha$ . Отримані співвідношення між геометричними розмірами першого і другого колеса дають змогу стверджувати, що  $K_{np}^{(1)} = K_{np}^{(2)} = K_{np}$ , а це дозволяє останній вираз подати у такому вигляді [78]:

$$\frac{G_{np}}{G} = 0,5 K_{np} (\rho_1 + \rho_3 + 2\rho_2) \frac{\omega}{G}.$$

Враховуючи те, що  $G = Q_1 \rho_1$ , маємо

$$\frac{G_{np}}{G} = 0,5 K_{np} \left( 1 + \frac{\rho_3}{\rho_1} + 2 \frac{\rho_2}{\rho_1} \right) \frac{\omega}{Q_1}.$$

Оскільки  $\frac{\rho_3}{\rho_1} = k_v$ , то

$$\frac{G_{np}}{G} = 0,5 \left( 1 + k_v + 2 \frac{\rho_2}{\rho_1} \right) \frac{K_{np}}{q}, \quad (2.16)$$

де  $q = \frac{Q_1}{\omega}$  – об'єм газу, який надходить на вхід першого колеса при повороті ротора нагнітача на один радіан, м<sup>3</sup>.

Втрати на тертя можна обчислити на основі формул Степанова і Пфлейдерера Для  $i$ -тої ступені [78]

$$N_{TP}^{(i)} = k_{i,T} \rho_{i,2} D_2^2 u_2^{(i)3}, \quad i = 1, 2.$$

де  $k_{i,T}$  – коефіцієнт, значення якого залежить від технології оброблення лопаток колеса нагнітача.

$D_2$  – зовнішній діаметр робочого колеса, м.

Допускаємо, що  $k_{1,T} = k_{2,T} = k_T$ .

Якщо значення  $u_{i,2}$ , обчислене за формулою (2.13) підставити в останнє рівняння, то отримаємо

$$N_{TP}^{(i)} = K_{i,T} \rho_{i,2} \omega^3.$$

Враховуючи те, що  $N_{TP} = N_{TP}^{(1)} + N_{TP}^{(2)}$ ,  $D_2^{(1)} = D_2^{(2)} = D_2$ ,  $\rho_{1,2} = \rho_2$  і  $\rho_{2,2} = \rho_3$ , маємо

$$N_{TP} = K_T (\rho_2 + \rho_3) \omega^3,$$

де  $K_T = k_T \frac{D_2^5}{8}$  [15].

Отже,

$$\frac{N_{TP}}{G} = K_T \left( \frac{\rho_2}{\rho_1} + k_v \right) \frac{\omega^2}{q}. \quad (2.17)$$

Якщо ступені підвищення тисків рівні, то для стиснення газу двоступеневим нагнітачем необхідно мінімум затрат енергії, тобто [79]

$$\varepsilon_1 = \varepsilon_2 = \varepsilon_k. \quad (2.18)$$

На практиці, як правило, відступають від принципу рівномірного розподілу затрат енергії за ступенями і на другу ступінь припадає дещо менший ступінь підвищення тиску. Тому для двоступеневого нагнітача рівність (2.18) буде наближеною.

Нехай  $\varepsilon_1$  і  $\varepsilon_2$  – ступені підвищення тиску першої та другої ступенів. Тоді загальний ступінь підвищення тиску  $\varepsilon = \varepsilon_1 \varepsilon_2$ . Якщо врахувати формулу (2.18), то можна обчислити

$$\varepsilon_k = \sqrt{\varepsilon}. \quad (2.19)$$

Визначимо відношення густин газу  $\frac{\rho_2}{\rho_1}$ , що входять до формул (2.16) і (2.17).

Для цього скористаємося рівнянням стану реального газу [37]

$$\rho_i = \frac{P_i}{z_i R T_i}, \quad i = 1, 2 \quad (2.20)$$

Формула (2.20) дає змогу отримати такий результат:

$$\frac{\rho_2}{\rho_1} = \frac{P_2}{P_1} \cdot \frac{z_1 T_1}{z_2 T_2}.$$

Між температурами  $T_1$  і  $T_2$  та тисками  $P_1$  і  $P_2$  існує функціональний взаємозв'язок [80]

$$\frac{P_2}{P_1} = \left( \frac{z_2 T_2}{z_1 T_1} \right)^{\sigma_1}, \quad (2.21)$$

де  $\sigma_1 = \frac{m_1}{m_1 - 1}$ ;  $m_1$  – показник політропи, який є функцією тисків  $P_1$  і  $P_2$  та температур

$T_1$  і  $T_2$ .

Враховуючи співвідношення (2.19) і (2.21), отримаємо

$$\frac{p_2}{p_1} = \varepsilon^{\frac{1}{2m_1}}. \quad (2.22)$$

Підставляючи значення  $\frac{G_{np}}{G}$  і  $\frac{N_{Tp}}{G}$ , що визначаються формулами (2.16) і (2.17) в (2.11) і, враховуючи формулу (2.22), отримаємо

$$hg = \left( 1 + 0,5(1 + k_v + 2k_{v_1}) \frac{K_{np}}{q} \right) h_e g + K_T (k_v + k_{v_1}) \frac{\omega^2}{q}. \quad (2.23)$$

Для визначення значення показника політропи  $m_1$  для умов входу у другу ступінь необхідно знати тиск  $P_2$  і температуру  $T_2$ . Оскільки  $\varepsilon_1 = \varepsilon_2$ , то  $\frac{P_2}{P_1} = \frac{P_3}{P_2}$ .

Звідси знаходимо, що

$$P_2 = \sqrt{P_1 P_3}. \quad (2.24)$$

Для двоступеневих нагнітачів підвищення температури після першої ступені можна обчислити за такою формулою [80]:

$$\Delta T_1 = \frac{T_3 - T_1}{2},$$

де  $T_3$  – температура газу на виході із нагнітача, К.

Тоді температура газу  $T_2$  на виході із першої ступені буде такою:

$$T_2 = T_1 + \Delta T_1. \quad (2.25)$$

Тепер зосередимо увагу на величині  $h_e g$ , значення якої визначається за формулою (2.10). Для обчислення функцій  $\varphi_{u2}^{(i)}$ ,  $i=1,2$  та  $\varphi_{u1}^{(2)}$  скористаємося формулами Пфлейдерера, враховуючи при цьому, що внутрішні і зовнішні діаметри коліс, кількість лопаток, вхідні і вихідні лопатеві кути  $\beta_1$  та  $\beta_2$  (рис. 2.4) та середня товщина лопаток робочих коліс першої та другої ступені робочих коліс однакові [15]

$$\varphi_{u2}^{(i)} = \mu \left( 1 - \varphi_{r2}^{(i)} \operatorname{ctg} \beta_2 \right), \quad i=1,2,$$

$$\varphi_{u1}^{(2)} = \mu \left( 1 - \varphi_{r1}^{(2)} \operatorname{ctg} \beta_1 \right),$$

де  $\mu$  – коефіцієнт корегування кінцевої остаточної кількості лопаток;

$\varphi_{r1}^{(2)}$  – коефіцієнт витрати віднесений до входу другої ступені;

$\varphi_{r2}^{(i)}$ ,  $i=1,2$  – коефіцієнти витрати, віднесені до виходу відповідно першої та другої ступеней.

Коефіцієнти витрат  $\varphi_{r2}^{(i)}$  та  $\varphi_{r1}^{(2)}$  знаходимо за наступними формулами [15]:

$$\varphi_{r2}^{(i)} = \frac{Q_1}{F_2^{(i)} u_2^{(i)} k_{v_i}}, \quad i=1,2,$$

$$\varphi_{r1}^{(2)} = \frac{Q_1}{F_1^{(2)} u_1^{(2)} k_{v_1}},$$

де  $F_1^{(2)} = \pi D_1 b_1^{(2)}$  – площа міжлопаткового каналу в перерізі входу газу в другу ступінь ВЦН, м<sup>2</sup>;

$F_2^{(1)} = \pi D_2 b_2^{(1)} \tau$  – площа міжлопаткового каналу в перерізі виходу газу із першої ступені ВЦН, м<sup>2</sup>;

$F_2^{(2)} = \pi D_2 b_2^{(2)} \tau$  – площа міжлопаткового каналу в перерізі виходу газу із другої ступені ВЦН, м<sup>2</sup>;

$k_{v_1} = \frac{\rho_2}{\rho_1}$  – поправка на стиснення газу першої ступені ВЦН;

$k_{v_2} = k_v = \frac{\rho_3}{\rho_1}$  – поправка на стиснення газу другої ступені ВЦН.

В останніх формулах  $b_1^{(2)}$ ,  $b_2^{(2)}$  – вхідна та вихідна ширина лопаток другого РК ВЦН, м;  $b_2^{(1)}$  – вихідна ширина лопатки першого РК ВЦН, м;  $D_1$  – внутрішній діаметр робочого колеса, м;  $\tau$  – коефіцієнт зменшення площі за допомогою лопаток РК, який знаходимо таким чином [15]

$$\tau = 1 - \frac{z_s \cdot \delta_m}{\pi \cdot D_2 \cdot \sin \beta_2},$$

де  $z_s$  – кількість лопаток РК;

$\delta_m$  – середня товщина лопаток кожного із двох коліс, м [15]:



$$\delta_m = \delta \left( 1 + \frac{2\Delta}{b_2} \right),$$

де  $\delta$  – товщина лопатки РК, м;

$\Delta$  – ширина полиці лопатки, м.

Виходячи із співвідношень (2.14), можна стверджувати, що  $u_2^{(1)} = u_2^{(2)} = u_2$  і  $u_1^{(2)} = u_1$ .

Отже, формула (2.11) набуде такого вигляду:

$$h_e g = \mu \left( 2u_2^2 - u_1^2 - Q_1 \left( \left( \frac{1}{F_2^{(1)} k_{v1}} + \frac{1}{F_2^{(2)} k_{v2}} \right) u_2 \operatorname{ctg} \beta_2 - \frac{u_1 \operatorname{ctg} \beta_1}{F_1^{(2)} k_{v1}} \right) \right),$$

де  $k_{v1} = \frac{\rho_2}{\rho_1} = \varepsilon^{\frac{1}{2m}}$ ,  $k_{v2} = k_v = \frac{\rho_3}{\rho_1}$ .

Оскільки  $\frac{\rho_3}{\rho_1} = \frac{P_3}{P_1} \cdot \frac{z_1 T_1}{z_3 T_3}$ , а  $\frac{P_3}{P_1} = \left( \frac{z_3 T_3}{z_1 T_1} \right)^{\sigma_2}$ , то

$$\frac{\rho_3}{\rho_1} = \varepsilon^{\frac{1}{m_2}}.$$

Якщо врахувати значення  $u_1$  і  $u_2$ , визначених із формул (2.13), то

$$h_e g = \mu \cdot \omega \left( \omega (2R_1^2 - R_2^2) - Q_1 \cdot \left( R_2 \cdot \operatorname{ctg} \beta_2 \left( \frac{1}{F_2^{(1)} k_{v1}} + \frac{1}{F_2^{(2)} k_{v2}} \right) - \frac{R_1 \operatorname{ctg} \beta_1}{F_1^{(2)} k_{v1}} \right) \right). \quad (2.26)$$

Враховуючи, що  $k_{v2} = k_v$  та  $q = \frac{Q_1}{\omega}$  запишемо (2.26) таким чином:

$$h_e g = \mu \cdot \omega^2 \left( (2R_1^2 - R_2^2) - q \cdot \left( \frac{R_2 \cdot \operatorname{ctg} \beta_2}{F_2^{(1)} k_{v1}} - \frac{R_1 \operatorname{ctg} \beta_1}{F_1^{(2)} k_{v1}} + \frac{R_2 \cdot \operatorname{ctg} \beta_2}{F_2^{(2)} k_v} \right) \right).$$

Введемо позначення:  $X_0 = \mu (2R_2^2 - R_1^2)$ ,  $X_1 = \mu \left( \frac{R_2 \operatorname{ctg} \beta_2}{F_2^{(1)}} - \frac{R_1 \operatorname{ctg} \beta_1}{F_1^{(2)}} \right)$ ,

$X_2 = \frac{\mu R_2 \operatorname{ctg} \beta_2}{F_2^{(2)}}$ . Отримали таке рівняння:

$$h_e g = \omega^2 \left( X_0 - q \left( \frac{X_1}{k_{v_1}} + \frac{X_2}{k_v} \right) \right). \quad (2.27)$$

Коефіцієнт корегування кінцевої остаточної кількості лопаток  $\mu$  Пфлейдерер рекомендує обчислювати за такою формулою [15]:

$$\mu = \frac{1}{1 + \frac{a + 1,2 \sin \beta_2}{z_s (1 - \lambda^2)}}, \quad (2.28)$$

де  $a = 1, 2$  – дослідний коефіцієнт;

$$\lambda = \frac{D_1}{D_2}.$$

Тепер можемо записати формулу для обчислення повної роботи, витраченої на стиснення одного кілограма газу. Для цього у вираз (2.23) підставимо значення  $h_e g$ , що визначається формулою (2.27). У результаті отримаємо

$$hg = \omega^2 \left[ \left( 1 + 0,5(1 + k_v + 2k_{v_1}) \frac{K_{np}}{q} \right) \left( X_0 - q \left( \frac{X_1}{k_{v_1}} + \frac{X_2}{k_v} \right) \right) + K_T \frac{k_{v_1} + k_v}{q} \right].$$

Останній вираз дає змогу формулу (2.7) записати в такому вигляді:

$$\varepsilon = k_v \left( 1 + \frac{1}{z_1 R T_1} \omega^2 \left[ \left( 1 + 0,5(1 + k_v + 2k_{v_1}) \frac{K_{np}}{q} \right) \left( X_0 - q \left( \frac{X_1}{k_{v_1}} + \frac{X_2}{k_v} \right) \right) + K_T \frac{k_{v_1} + k_v}{q} \right] \right). \quad (2.29)$$

У формулі (2.29) величини  $k_v$  і  $k_{v_1}$  виражено через технологічні параметри нагнітача.

Співвідношення (2.29) можна спростити, якщо скористатися зведеними технологічними параметрами. Об'ємну продуктивність за умов усмоктування замінимо зведеною продуктивністю [79]

$$Q_{\Pi} = Q_1 \frac{n_n}{n},$$

де  $n_n$  – номінальна кількість обертів робочого колеса, об/хв;

$n_n$  – кількість обертів робочого колеса, об/хв.

Кількість обертів РК  $n$  замінюємо на зведену кількість обертів РК [79]:

$$n_{\Pi} = \frac{n_{\text{н}}}{n} \sqrt{\frac{A_0}{z_1 R T_1}},$$

$$A_0 = z_0 R_0 T_0;$$

$z_0, R_0, T_0$  – параметри зведення.

Оскільки  $\omega = 2\pi n$  [37], то в двох останніх рівняннях можна замінити відношення  $\frac{n}{n_{\text{н}}}$  на  $\frac{\omega}{\omega_{\text{н}}}$ . Тому  $q = \frac{Q_1}{\omega} = \frac{Q_{\Pi}}{\omega_{\text{н}}}$  і  $\omega = n_{\Pi} \omega_{\text{н}} \sqrt{\frac{z_1 R T_1}{A_0}}$ .

Якщо тепер у рівняння (2.29) підставити значення  $\omega$ , то отримаємо

$$\frac{\varepsilon}{k_v} = 1 + \frac{n_{\Pi}^2 \omega_{\text{н}}^2}{A_0} \left( \left( 1 + 0,5(1 + k_v + 2k_{v_1}) \frac{K_{np}}{q} \right) \left( X_0 - q \left( \frac{X_1}{k_{v_1}} + \frac{X_2}{k_v} \right) \right) + K_T \frac{k_{v_1} + k_v}{q} \right).$$

Позначивши  $A = \frac{A_0}{\omega_{\text{н}}^2}$ , отримаємо:

$$\left( \frac{\varepsilon}{k_v} - 1 \right) A = n_{\Pi}^2 \left( \left( 1 + 0,5(1 + k_v + 2k_{v_1}) \frac{K_{np}}{q} \right) \left( X_0 - q \left( \frac{X_1}{k_{v_1}} + \frac{X_2}{k_v} \right) \right) + K_T \frac{k_{v_1} + k_v}{q} \right). \quad (2.30)$$

Розв'язок рівняння (2.30) щодо продуктивності нагнітача природного газу наведений у додатку Б. У результаті отримаємо [78]

$$Q_1 = \omega \left( -0,5 \frac{\alpha_1}{\alpha_0} + \sqrt{\frac{1}{4} \left( \frac{\alpha_1}{\alpha_0} \right)^2 + \frac{\alpha_2}{\alpha_0}} \right), \quad (2.31)$$

$$\text{де } \alpha_0 = \frac{X_1}{k_{v_1}} + \frac{X_2}{k_v}; \quad \alpha_1 = \left( \frac{\varepsilon}{k_v} - 1 \right) \frac{A}{n_{\Pi}^2} - X_0 + 0,5(1 + k_v + 2k_{v_1}) \left( \frac{X_1}{k_{v_1}} + \frac{X_2}{k_v} \right) X_3;$$

$$\alpha_2 = 0,5(1 + k_v + 2k_{v_1}) X_0 X_3 + X_4, \text{ де } X_3 = K_{np}; \quad X_4 = K_T (k_{v_1} + k_v).$$

Аналіз формули (2.30) показує, що величини  $X_1, X_2$  та  $X_3$  визначаються через радіальний зазор  $s$ , середню товщину і ширину лопаток  $\delta_m$  і  $b_i^{(j)}$ , тобто,  $X_i = X_i(b_i^{(j)}, \delta_m)$ ,  $X_3 = X_3(s)$ ,  $i = 1, 2, j = 1, 2$ . З огляду на те, що залежності  $X_3(s)$  і

$X_i(b_i^{(j)}, \delta_m)$   $i=1, 2, j=1, 2$  є складними функціями своїх параметрів, які змінюються у процесі експлуатації ВЦН, то доцільно визначати не значення  $s$ ,  $\delta_m$  і  $b_i^{(j)}$ , а величини  $X_1$ ,  $X_2$  та  $X_3$ , які назвемо параметрами технічного стану двоступеневого ВЦН природного газу [82-85].

## 2.2 Лінеаризована математична модель двоступеневого ВЦН природного газу

Одним із перспективних напрямів контролю функціонального стану ГПА є побудова математичних моделей як ГПА, так і його елементів [69]. Такі моделі мають функціонально пов'язувати технологічні параметри (вхідні величини) і геометричні розміри елементів (вихідні величини), які зазнають зношування у процесі експлуатації. Під впливом експлуатаційних факторів, таких як різні режими роботи, якість природного перекачуваного газу, дотримання персоналом КС правил технічної експлуатації змінюються теплотехнічні характеристики ВЦН. Такі зміни, в основному, відбуваються через ерозійне зношення вхідних напрямних апаратів, дисків і лопаток робочих коліс, лопатевих або безлопатевих дифузорів; через зношення ущільнюваних вусиків у лабіринтових ущільненнях по накривальному диску [15].

Можливість оцінювати стан ВЦН за відхиленнями його технологічних параметрів впливає з того, що поява будь-якого дефекту в проточній частині ВЦН пов'язана зі зміною геометричних розмірів тих чи інших елементів проточної частини. Зв'язок між параметрами дефекту (геометричними розмірами чи параметрами, що характеризують певний дефект) і технологічними параметрами ВЦН здійснюється через математичну модель. У цьому випадку вона є каналом для передачі інформації від параметрів, що характеризують дефект (параметрів стану) до технологічних параметрів (ознак стану) [81].

Для отримання інформації про технічний стан ВЦН 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. Опираючись на результати роботи [14], встановили, що максимальне відхилення параметрів технічного стану двоступеневого ВЦН від своїх початкових значень не перевищує 10 %. За таких умов наступну функціональну залежність можна розкласти у ряд Тейлора, обмежившись лише лінійними членами розкладу.

$$Q_1 = \varphi(\bar{X}),$$

де  $\bar{X} = (X_1, X_2, X_3)^T$ ;

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

Тоді [83]

$$\Delta Q_1 = \sum_{i=1}^n \frac{\partial \varphi(\bar{X})}{\partial X_i} \Delta X_i, \quad i=3, \quad (2.32)$$

де  $\Delta Q_1 = Q_{count}^{(0)} - Q_1$ ;

$Q_{count}^{(0)}$  – перераховане значення об’ємної продуктивності нового (або після капітального ремонту) нагнітача до поточних умов;

$Q_1$  – поточне значення об’ємної продуктивності нагнітача.

$$\Delta X_i = X_i^{(0)} - X_i, \quad i=1,2,3;$$

$X_i^{(0)}$  – значення параметрів технічного стану двоступеневого ВЦН, що відповідають  $Q_{count}^{(0)}$ .

Обчислення часткових похідних, що входять до формули (2.32), наведене в додатку В. Отримали [83]:

$$\frac{\partial \varphi(\bar{X})}{\partial X_1} = \frac{\omega}{2r\alpha_0 k_{v1}} \left( \left( \frac{r_1}{2} - r \right) \left( \frac{X_3}{2} (1 + k_v + 2k_{v1}) - r_1 \right) - r_2 \right); \quad (2.33)$$

$$\frac{\partial \varphi(\bar{X})}{\partial X_2} = \frac{\omega}{2r\alpha_0 k_v} \left( \left( \frac{r_1}{2} - r \right) \left( \frac{X_3}{2} (1 + k_v + 2k_{v1}) - r_1 \right) - r_2 \right); \quad (2.34)$$

$$\frac{\partial \varphi(\bar{X})}{\partial X_3} = \frac{\omega(1+k_v+2k_{v1})}{4r\alpha_0} \left( \left( \frac{r_1}{2} - r \right) \alpha_0 + X_0 \right). \quad (2.35)$$

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

входять до рівняння (2.32), необхідно знати значення  $X_i^{(0)}$ . Їх можна визначити двома способами – аналітичним або, скориставшись процедурою ідентифікації математичної моделі (2.31). Для реалізації першого способу необхідно мати інформацію про значення величин  $\mu$  та  $k_T$ .

Величину  $\mu$  можна визначити за допомогою формули К. Пфлейдерера (2.28). Коефіцієнт  $k_T$  залежить від числа Рейнольдса, відношення бокового зазору та шорсткості поверхонь дисків. Похибка даних формул може сягати 10-20 %, оскільки вони мають емпіричний характер. Величини  $\mu$  та  $k_T$  входять до лінеаризованої моделі (2.32), тому для їхнього уточнення використовують процедуру ідентифікації математичної моделі (2.31).

Ідентифікація параметрів  $X_i^{(0)}$ ,  $i=\overline{0,4}$  математичної моделі (2.31) здійснюється, коли ВЦН новий або він запущений у роботу після капітального ремонту.

Для розв'язку поставлених задач доцільно застосувати метод найменших квадратів (МНК), суть якого полягає в тому, що мінімізується функціонал [86]

$$J(\bar{x}) = \frac{1}{2} \sum_{j=1}^N e_j^2(\bar{x}), \quad (2.36)$$

де  $\bar{x}^T = (X_0^{(0)}, X_1^{(0)}, X_2^{(0)}, X_3^{(0)}, X_4^{(0)})$  – вектор параметрів моделі (2.31);

$e_j(\bar{x}) = \tilde{Q}_j - Q_1(\bar{x}, \bar{u}^{(j)})$  – функція нев'язки;

$Q_1(\bar{x}, \bar{u}^{(j)})$  – продуктивність нагнітача природного газу, що обчислена за формулою (2.31);

$\tilde{Q}_j$  – продуктивність нагнітача природного газу, вимірюної на об’єкті;

$\bar{u}^T = (P_a, T_a, T_1, T_2, P_1, P_2, \omega)$  – вектор технологічних параметрів;

$P_a, T_a$  – атмосферний тиск і температура навколишнього середовища;

$T_1, T_2, P_1, P_2$  – відповідно температури і тиски на вході та виході нагнітача;

$N$  – кількість спостережень (вимірювань) в експериментальному дослідженні.

Очевидно, що на шукані величини  $X_i^{(0)}$ ,  $i = \overline{0,4}$  необхідно накласти таке обмеження:

$$X_i^{(0)} \geq 0, i = \overline{0,4}. \quad (2.37)$$

Функція (2.36) з обмеженням (2.37) є цільовою функцією, тому поставлену задачу розглянемо як оптимізаційну задачу, успішний розв’язок якої залежить від вибору відповідного методу розв’язку. Через те, що градієнтні методи (методи Ньютона-Гауса, Левенберга-Марквардта, квазіньютонівські методи) дозволяють знайти екстремальне значення функції, але не завжди знаходять значення глобального екстремуму, а більш точні оптимізаційні методи вимагають значного часу обчислення, доцільно використовувати стохастичні методи (генетичні алгоритми, нейромережі, нечіткі системи) [87-90]. Оскільки генетичні алгоритми (ГА) мають меншу ймовірність потрапляння в локальний оптимум через використання так званого популяційного підходу, то як альтернативу градієнтним методам для розв’язку задачі МНК (2.36) з обмеженням (2.37) використовуємо ГА.

### 2.3 Емпірична модель двоступеневого ВЦН природного газу

Зношення елементів проточної частини ВЦН приводить до зміни його продуктивності, але така зміна може відбутися і в результаті зміни технологічних параметрів нагнітача. Для усунення фактора залежності продуктивності нагнітача від технологічних параметрів і виявлення зміни продуктивності нагнітача від параметрів технічного стану двоступеневого ВЦН необхідно поточну продуктивність приводити до умов нового нагнітача або після його КР. Для цього

необхідно на основі спостережень за роботою нового нагнітача або після його КР побудувати емпіричну модель.

Для побудови емпіричної математичної моделі використовуємо індуктивний метод самоорганізації моделей, який полягає в перебиранні великої кількості варіантів моделей за відповідним зовнішнім критерієм (регулярності, мінімуму зміщення, балансу змінних і комбіновані). Частина експериментальних даних використовується для оцінювання моделей-претендентів, а інша частина – для отримання оцінок коефіцієнтів і пошуку оптимальної структури моделі. Серед переваг цього методу можна виділити такі [91-97]:

- невеликий обсяг експериментальних даних;
- структура моделі не визначається довільно, а відповідає мінімуму зовнішнього критерію;
- оснований на використанні зовнішніх критеріїв, які відповідно до теореми Геделя дають змогу вибрати єдину модель оптимальної складності;
- кількість коефіцієнтів моделі не залежить від кількості точок таблиці експериментальних даних;
- достатньо точні прогнози, оскільки цей метод базується на принципі існування оптимального розміру і складності моделі.

Для визначення варіацій параметрів технічного стану двоступеневого ВЦН, які проявляються після певного періоду роботи ВЦН, крім значень  $X_i^{(0)}$ ,  $i = \overline{0,4}$  необхідно мати значення поточної об'ємної продуктивності  $Q_j^{(count)}$ , що перераховані до умов  $Q_j^{(0)}$ .

Аналіз формули (2.31) показує, що поточне значення об'ємної продуктивності нагнітача природного газу  $Q$  є функцією технологічних параметрів [83]

$$Q_1 = f(\omega, T_1, T_2, P_1, P_2, P_a). \quad (2.38)$$

Залежність (2.38) шукатимемо у вигляді полінома із відомим максимальним степенем  $m$  [83]:



$$y_i = \sum_{i=0}^M a_i \prod_{j=1}^n x_j^{s_{ji}}, \quad (2.39)$$

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.

Степені полінома формуємо у вигляді матриці, що полегшує ідентифікацію степенів змінних за відповідних коефіцієнтів. Матриця степенів формується автоматично.

Степені  $s_{ji}$  аргументів набувають цілих значень  $0, 1, \dots, m$ , причому їхня сума не має перебільшувати значення  $m$  [91]:

$$\sum_{j=1}^n s_{ji} \leq m. \quad (2.40)$$

Змінні, що входять до емпіричної моделі (2.39), приводимо до безрозмірного вигляду [83]:

$$y_i = \frac{Q_i - Q_{\min}}{Q_{\max} - Q_{\min}}, \quad (2.41)$$

$$x_j^{(i)} = \frac{Z_j^{(i)} - Z_{j,\min}^{(i)}}{Z_{j,\max}^{(i)} - Z_{j,\min}^{(i)}}, \quad i = \overline{1, n}, \quad (2.42)$$

де  $Z_1 = P_1$ ;  $Z_2 = P_3$ ;  $Z_3 = T_1$ ;  $Z_4 = T_3$ ;  $Z_5 = \omega$ ;  $Z_6 = P_a$ ;  $Q_{\min} = \min_{i \in N} \{Q_i\}$ ;

$$Q_{\max} = \max_{i \in N} \{Q_i\};$$

Кількість членів  $M$  полінома (2.39) визначаємо за такою формулою [91]:

$$M = \frac{(m+n)!}{m!n!} \quad (2.43).$$

Оскільки модель (2.39) є поліноміальною моделлю і не вміщує аргументу часу, то для визначення її оптимальної структури доцільно використовувати критерій регулярності (2.44) або критерій зміщення (2.45), що забезпечує однозначність результатів перебирання та меншу чутливість до похибок вимірювальних даних на об'єкті [92]:

$$\Delta^2(B) = \frac{\sum_{i=1}^{N_B} (Y^{(i)}(B) - y^{(i)}(B))^2}{\sum_{i=1}^{N_B} Y^{(i)}(B)^2} \quad (2.44)$$

$$\Delta^2(A, B) = \frac{\sum_{i=1}^N (y^{(i)}(A) - y^{(i)}(B))^2}{\sum_{i=1}^N (Y^{(i)})^2}, \quad (2.45)$$

де  $y^{(i)}(A)$ ,  $y^{(i)}(B)$  – значення виходу моделі, обчислені відповідно на множинах експериментальних значень навчальної  $N_A$  та перевірної  $N_B$  послідовностей.

Критерій регулярності (2.44) – це середньоквадратична похибка, що розрахована на нових точках, які не використовувались для отримання оцінок коефіцієнтів моделі. Величина критерію регулярності обчислюється за даними окремої перевірної послідовності  $N_B$ . Критерій мінімуму зміщення (2.45) вимагає максимального співпадіння значень вихідної величини двох моделей, отриманих на двох різних частинах таблиці початкових даних. Це означає, що модель, отримана на множині точок  $N_A$ , має якомога менше відрізнятись від моделі, отриманої на множині точок  $N_B$ .

Критерій регулярності (2.44) використовує такий розподіл даних експерименту [95]:  $N_A = 0,7N$  і  $N_B = 0,3N$ , а критерій зміщення (2.45) –  $N_A = 0,5N$  і  $N_B = 0,5N$ .

Реалізацію індуктивного методу самоорганізації моделей загалом поділимо на такі етапи [98]:

- збір апріорної інформації про об'єкт;

- поділ отриманої інформації на дві частини: навчальну  $N_A$  і перевірну  $N_B$  множини;
- генерування структур для часткових моделей із використанням відповідного алгоритму;
- індуктивний перебір моделей, знаходження мінімуму комбінованого критерію, що вказує на єдину модель оптимальної складності;
- оцінювання моделей-претендентів.

Для організації перебирання моделей-претендентів, як правило, використовують метод групового урахування аргументів (МГУА), запропонований наприкінці 60-х – початку 70-х академіком О. Г. Івахненком [93]. Цей метод включає два основні способи генерації моделей-претендентів. Перший із них – комбінаторний метод МГУА, який вирішує задачу самоорганізації за допомогою повного перебирання моделей із виразу (2.39) з різною структурою, що визначається шляхом прирівнювання до нуля відповідних коефіцієнтів. Вибір необхідної моделі здійснюється на основі зовнішніх критеріїв (2.44) або (2.45).

Другий спосіб відомий як багаторядний пороговий алгоритм МГУА, в якому перебирання моделей-претендентів здійснюється на основі багаторядної процедури. Найчастіше цей спосіб реалізують за допомогою нейромереж [99-100], в яких модель (2.39) представлена у виді множини нейронів, у якій окремі пари в кожному шарі пов'язані між собою через квадратний поліном і таким чином утворюються нові нейрони в наступному шарі.

Оскільки комбінаторний метод виконує повне перебирання моделей-претендентів і такий підхід створює труднощі при реалізації на ЕОМ, автори праць [92-96] рекомендують використовувати даний метод при  $n \leq 20$ . Тому для зняття проблеми великої розмірності застосуємо генетичний підхід, запропонований Горбійчуком М. І. [101]. Ефективність та придатність методу синтезу емпіричних моделей оптимальної складності із застосуванням генетичного підходу підтверджена авторами праць [87, 97].

## 2.4 Метод визначення зміни параметрів технічного стану двоступеневого ВЦН природного газу

Перерахунок об'ємної продуктивності нового нагнітача (або після КР) до поточних умов здійснено за формулою [83]:

$$y_{count}^{(0)} = F \bar{a}, \quad (2.46)$$

де  $F$  – матриця, яка утворена із функцій  $f_i(\bar{x}) = \prod_{j=1}^n (x_j)^{s_{ji}}$ , де  $x_j$ ,  $j = \overline{1,6}$  – поточні

вхідні змінні моделі, приведені до безрозмірного вигляду;

$\bar{a}$  – параметри емпіричної моделі (2.39) включаючно з нульовими їхніми значеннями.

Перехід від безрозмірних одиниць до розмірних здійснено відповідно з (2.41)

$$Q_{count,i}^{(o)} = y_{count,i}^{(0)} (Q_{max}^{(0)} - Q_{min}^{(0)}) + Q_{min}^{(0)}, \quad (2.47)$$

де  $Q_{min}^{(0)}$  – мінімальна продуктивність нового нагнітача (або після КР), м<sup>3</sup>/с;

$Q_{max}^{(0)}$  – максимальна продуктивність нового нагнітача (або після КР), м<sup>3</sup>/с.

Знаючи значення величин  $Q_{count,i}^{(o)}$ , а також значення параметрів  $X_i^{(0)}$ ,  $i = \overline{0,4}$ , за

формулами (2.33) – (2.35) знайдемо величини  $\beta_i = \frac{\partial \varphi(\bar{X}^{(0)})}{\partial X_i}$ ,  $i = 1, 2, 3$ .

Аналіз залежності (2.32) та (2.33) – (2.35) показує, що

$$\beta_i^{(k)} = \beta_i(\bar{X}, \bar{u}^{(k)}), \quad (2.48)$$

де  $\bar{u}^{(k)} = (\varepsilon^{(k)}, n^{(k)}, T_1^{(k)}, z_1^{(k)}, \omega^{(k)})^T$ ,  $k = \overline{1, N}$ .

З урахуванням прийнятих позначень залежність (2.32) набуде такого вигляду:

$$\Delta Q^{(k)} = \beta_1(\bar{X}, \bar{u}^{(k)}) \Delta X_1 + \beta_2(\bar{X}, \bar{u}^{(k)}) \Delta X_2 + \beta_3(\bar{X}, \bar{u}^{(k)}) \Delta X_3. \quad (2.49)$$

Задача тепер у тому, щоб за значеннями  $\Delta Q_k^{(count)} = Q_{count,k}^{(0)} - Q_k$  і значеннями  $\Delta Q(\bar{X}, \bar{u}^{(k)}, \Delta \bar{X})$ , обчислюваними за формулою (2.49), знайти значення  $\Delta X_i$ ,  $i = 1, 2, 3$ .

Розв'язок поставленої задачі ґрунтується на використанні МНК. Відповідно до цього методу мінімізується критерій апроксимації

$$J(\Delta\bar{X}) = \sum_{k=1}^N \left( \Delta Q_k^{(count)} - \Delta Q(\bar{X}, \bar{u}^{(k)}, \Delta\bar{X}) \right)^2. \quad (2.50)$$

Мінімізація виразу (2.50) стосовно значень  $\Delta X_i$ ,  $i=1,2,3$  приводить до такого результату [83]:

$$\Delta\bar{X} = CF^T \Delta\bar{Q}^{(count)}, \quad (2.51)$$

де  $C = (F^T F)^{-1}$ ;

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

$$F = \begin{bmatrix} \beta_1(\bar{X}, \bar{u}^{(1)}) & \beta_2(\bar{X}, \bar{u}^{(1)}) & \beta_3(\bar{X}, \bar{u}^{(1)}) \\ \beta_1(\bar{X}, \bar{u}^{(2)}) & \beta_2(\bar{X}, \bar{u}^{(2)}) & \beta_3(\bar{X}, \bar{u}^{(2)}) \\ \dots & \dots & \dots \\ \beta_1(\bar{X}, \bar{u}^{(N)}) & \beta_2(\bar{X}, \bar{u}^{(N)}) & \beta_3(\bar{X}, \bar{u}^{(N)}) \end{bmatrix}.$$

Отже, за значеннями величин  $\Delta X_i$ , можна оцінити технічний стан проточної частини двоступеневого ВЦН.

Отримані значення  $\Delta X_i$ ,  $i=1, 2, 3$  слід розглядати як нечіткі величини, зважаючи на те, що інформація, на основі якої прийматиметься рішення про поточний стан проточної частини ВЦН, є нечіткою, оскільки процеси, що протікають в проточній частині нагнітача є суттєво нелінійними стохастично-хаотичними, які виникають в умовах апіорної та поточної невизначеності під впливом недосяжних для вимірювання збурень.

Стан проточної частини ВЦН визначатимемо не за абсолютними значеннями варіацій  $\Delta X_i$ ,  $i=1, 2, 3$ , а за їхніми відносними значеннями, що виражені у відсотках

$$\Delta x_i = \frac{|\Delta X_i|}{X_i} \cdot 100\%, \quad i=1,2,3. \quad (2.52)$$

Отже, в цьому розділі розроблено математичну модель двоступеневого

відцентрового нагнітача природного газу (2.31), що виражає залежність продуктивності нагнітача природного газу від його технологічних і геометричних параметрів та враховує втрати на витоки газу і тертя дисків. Також розроблено метод ідентифікації параметрів математичної моделі двоступеневого нагнітача природного газу, який дає змогу розрахувати параметри технічного стану ВЦН, що відповідають умовам роботи нового нагнітача або після його КР. Результати виконаних досліджень висвітлено в працях [78, 83-85]

### **Висновки до розділу**

1. На основі рівнянь матеріального та енергетичного балансів розроблено математичну модель двоступеневого відцентрового нагнітача природного газу (2.31), що виражає залежність продуктивності нагнітача природного газу від його технологічних і геометричних параметрів та враховує втрати на витоки газу і тертя дисків.

2. Для ідентифікації параметрів технічного стану двоступеневого ВЦН, які відповідають умовам роботи нового нагнітача або після його КР, та величин коефіцієнта корегування кінцевої остаточної кількості лопаток  $\mu$  та коефіцієнта  $k_T$ , що входять до розробленої математичної моделі (2.31), використано МНК, в якому для мінімізації розв'язання цільової функції застосовано генетичний алгоритм, який буде описаний в наступному розділі.

3. Для усунення фактора залежності продуктивності нагнітача від його технологічних параметрів і виявлення зміни продуктивності нагнітача від параметрів технічного стану двоступеневого ВЦН побудовано його емпіричну модель (2.39) із використанням індуктивного методу самоорганізації моделей.

4. Для оцінювання технічного стану проточної частини нагнітача розроблено метод визначення зміни параметрів технічного стану двоступеневого ВЦН природного газу.

## РОЗДІЛ 3

### МЕТОДИКА ПРОВЕДЕННЯ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ НА ОБ'ЄКТІ

#### 3.1 Умови проведення експериментальних досліджень

Одним із важливих завдань досліджень було отримання експериментального матеріалу для побудови математичної моделі двоступеневого нагнітача природного газу із врахуванням його геометричних параметрів та втрат на витоки газу і тертя дисків.

Існує два способи одержання необхідного матеріалу для побудови математичних моделей нагнітачів – активний і пасивний [102]. Оскільки реалізація активного способу передбачає втручання в нормальний хід технологічного процесу, ми використовуємо пасивний спосіб, тобто спостереження за нормальною роботою ВЦН для отримання матеріалу й ідентифікації та контролю параметрів двоступеневого нагнітача природного газу.

Сучасна система автоматизованого збору інформації про процес компримування газу на КС-39 «Прогрес» забезпечує архівування результатів вимірювання через кожні дві години в добовій відомості усіх контрольованих параметрів. Досліджено роботу ЕГПА-25РЧ, який встановлений на КС-39 «Прогрес» та являє собою автоматизований агрегат із електродвигуном типу 4Б-284-02Г виробництва СКД (Прага) потужністю 25МВт, двоступеневим ВЦН 650-21-2 із ступенем підвищення тиску газу, рівним 1,44, мікропроцесорною системою автоматичного управління із антипомпажним регулюванням.

Основні характеристики роботи ВЦН 650-21-2 містить таблиця 3.1 [77].

Експлуатаційні характеристики роботи агрегату фіксували на протязі місяця до КР і на протязі місяця після нього. Приклад сформованої бази даних за 1.11.2014 показаний у вигляді фрагменту Ехсел-таблиці (табл. 3.2).

Таблиця 3.1

## Основні технологічні та геометричні параметри роботи ВЦН 650-21-2 [77]

Назва параметра	Значення
Продуктивність нагнітача, м <sup>3</sup> /хв	630
Кількість обертів, об/хв	3700
Політропний к.к.д.	0,84
Ступінь підвищення тиску	1,44
Потужність, кВт	25000
Внутрішній діаметр РК, мм	590
Зовнішній діаметр РК, мм	1080
Вхідний лопатевий кут РК, град	35°
Вихідний лопатевий кут РК, град	48°
Кількість лопаток РК	11/22

Дата початку ремонту – 19 квітня 2011 року, дата закінчення ремонту – 17 липня 2011 року. ГПА відпрацював: з початку експлуатації 30632 годин, від останнього ремонту 10069 годин, мав за останній міжремонтний період 59 пусків, 59 зупинок, з них 5 аварійних. 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 зношення проточної частини ВЦН 650-21-2 [103].

Програма досліджень передбачала отримання даних для побудови математичної моделі двоступеневого відцентрового нагнітача природного газу. Виходячи з проведеного аналізу літературних джерел, основними параметрами, що визначають стан ВЦН, є такі [104]: об'ємна продуктивність нагнітача  $Q_{\text{вн}}$ , перепад тиску на вхідному конфузори ВЦН  $\Delta P$ , тиск газу на вході  $P_{\text{вх}}$  і виході  $P_{\text{вих}}$  ВЦН, температура газу на вході  $T_{\text{вх}}$  і виході  $T_{\text{вих}}$  ВЦН, атмосферний тиск  $P_a$ , кількість обертів ротора нагнітача  $n$ , густина природного газу  $\rho_2$ .

Густину природного газу  $\rho_2$  визначаємо за формулою [1]:

$$\rho_2 = \frac{M_2}{22,4},$$



Таблиця 3.2

## Фрагмент Ехсел-таблиці параметрів роботи ВЦН

№ n/n	Час доби		10	12	14	16	18	20.00			
1	2		3	4	5	6	7	8			
2	Загальноцехові параметри	Тиск входу КЦ, кгс/см <sup>2</sup>		32,05	31,99	31,95	32,12	31,84	31,27		
3		Темп. входу КЦ, °С		16,68	16,85	17,03	16,98	16,95	17,02		
4		Тиск за АПОГ, кгс/см <sup>2</sup>		39,83	39,81	39,78	39,75	39,72	39,71		
5		Темп. за АПОГ, °С		31,23	31,02	32,3	31,05	32,77	32,27		
2	Пара- метри атм. пов.	Температура, °С		-1,14	0,63	1,56	0,46	-0,13	0,12		
3		Баром. тиск, мм рт. ст.		734,13	733,97	733,36	733,5	733,69	733,75		
4	ПАРАМЕТРИ СИСТЕМ ГПА	Утилізація	Р води вх., кгс/см <sup>2</sup>		3,24	3,15	3,28	3,29	3,3	3,21	
5			Р води вих., кгс/см <sup>2</sup>		2,02	1,94	2,11	2,08	2,07	1,92	
6			t <sub>в</sub> вх., °С		51,9	51,7	53,2	52,9	46,2	45,8	
7			t <sub>в</sub> вих., 1УТ/2УТ, °С		51,9/66,4	51,7/66,2	53,2/67,9	52,9/67,3	46,2/60,8	45,8/60,8	
8		Розрідження повітря в камері всмоктування, кгс/см <sup>2</sup>		0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000		
9		Перепад тиску повітря на фільтрах тонкого очищення ПОП, кгс/см <sup>2</sup>		0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00		
10		Температура під кожухом, °С		32,4 31	32,3 30,69	33,49 31,99	35,29 33,79	32,3 30,79	33,99 32,19		
11		ІПАЧ	Темпера- тура масла, °С	У баці нагнітача		44,2	43,6	42,7	40,5	39,4	41,8
12				На зливі з ПОП		33,9	33,7	33,8	33,4	36,2	33,8

де  $\rho_2$  – густина природного газу, кг/м<sup>3</sup>;

$M_2$  – молекулярна маса природного газу.

За результатами хроматографічного аналізу (табл. 3.3) відомий об'ємний (мольний) склад суміші природного газу в відсотках, тому його молекулярну масу  $M_2$  визначаємо за такою формулою [1]:

$$M_2 = 0,01 \sum_{i=1}^n V_i M_{ri},$$

де  $V_i$ ,  $i = \overline{1, n}$  – об'ємні концентрації компонентів;

$M_i, i = \overline{1, n}$  – молекулярні маси компонентів.

Таблиця 3.3

**Фізико-хімічні показники компонентів газу [103]**

Найменування ФХП газу		Фактичні результати аналізу газу, % об'ємний
Метан	(CH <sub>4</sub> )	95,317
Етан	(C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> )	2,433
Пропан	(C <sub>3</sub> H <sub>8</sub> )	0,706
Бутани	(C <sub>4</sub> H <sub>10</sub> )	0,227
Пентани	(C <sub>5</sub> H <sub>12</sub> )	0,041
Гексани+вищ.,	(C <sub>6</sub> H <sub>14</sub> )	0,017
Азот	(N <sub>2</sub> )	0,838
Діоксид вуглецю	(CO <sub>2</sub> )	0,415
Кисень	(O <sub>2</sub> )	0,006
Густина хроматографічна	кг/м <sup>3</sup>	0,7128
Теплота згорання (нижча)	ккал/м <sup>3</sup>	8168
Кількість Воббе (вище)	ккал/м <sup>3</sup>	11772
Сірководень	г/м <sup>3</sup>	-
Меркаптанова сірка	г/м <sup>3</sup>	-
Механічні домішки	г/м <sup>3</sup>	-

Відносна густина газу рівна  $\Delta = \frac{\rho_g}{\rho_{нов}}$ , де  $\rho_{нов} = 1,205$  – густина повітря за стандартних умов, кг/м<sup>3</sup>.

Коефіцієнти стисливості газу на вході  $z_1$  та виході  $z_2$  визначаємо за модифіковим рівнянням стану «Бенедикта-Вебба-Рабіна» [53]:

$$z_{1,2}^3 - z_{1,2}^2 - a \cdot z_{1,2}^3 - b = 0,$$

$$\text{де } a = \left( \frac{0,1237}{\tau_{1,2}} - \frac{0,3468}{\tau_{1,2}^2} - \frac{0,1188}{\tau_{1,2}^4} \right) \cdot \pi_{1,2};$$

$$b = \left( \frac{0,0291}{\tau_{1,2}^2} - \frac{0,0273}{\tau_{1,2}^3} - \frac{0,039}{\tau_{1,2}^5} \right) \cdot \pi_{1,2}^2;$$

$\pi_{1,2} = (P_{1,2} + 1,33 \cdot 10^{-4} \cdot P_a) / P_{кр}$  – приведений тиск на вході і виході ВЦН;

$\tau_{1,2} = (t_{1,2} + 273) / T_{кр} = T_{1,2} / T_{кр}$  – приведена температура на вході і виході ВЦН;

$P_{кр} = 4,67 - 0,1\Delta$  – критичний тиск, МПа;

$T_{кр} = 99,8 + 162,8\Delta$  – критична температура газу, К.

При роботі ЕГПА-25РЧ у номінальному режимі потрібний контроль за робочою точкою компресора, яка має лежати правіше від помпажної лінії не більше ніж на 10 %, а споживча компресором потужність не має перевищувати номінальну більше ніж на 20 %. Робоча точка залежить від об'ємної продуктивності та частоти обертання ротора нагнітача. Об'ємну продуктивність компресора за умовами всмоктування в м<sup>3</sup>/хв визначаємо за формулою [77]

$$Q_{ес} = A_k \cdot \sqrt{\frac{\Delta P \cdot Z_1 \cdot R \cdot T_1}{P_1}}, \quad (3.1)$$

де  $A_k$  – коефіцієнт конфузору (паспортні дані), м<sup>2</sup>;

$\Delta P$  – перепад тиску на конфузори, МПа;

$Z_1$  – коефіцієнт стисливості компримованого газу на вході в нагнітач;

$R$  – газова стала газу, Дж/(кг·К);

$T_1$  – температура на вході в нагнітач, К;

$P_1$  – тиск газу на вході в нагнітач, МПа.

### 3.2 Методи та технічні засоби ідентифікації і контролю параметрів нагнітачів на КС-39 «Прогрес».

На ЕГПА-25РЧ передбачений контроль технологічних параметрів двигуна, нагнітача, допоміжних систем агрегату, блоків та відсіків ГПА. На нагнітачі вимірюють такі параметри [77]:

- температуру газу на вході нагнітача;

- температуру газу на виході нагнітача;
- тиск газу на вході в нагнітач;
- тиск газу на виході з нагнітача;
- перепад тиску природного газу на конфузори нагнітача;
- кількість обертів валу ВЦН.

Вимірювальні канали автоматизованої системи керування (АСК) забезпечують вимірювання технологічних параметрів і їхнє порівняння із заданими значеннями обмежень (попереджувальних та аварійних), що наведені в паспортних даних ЕГПА-25РЧ [77].

До складу АСК входять аналогові давачі технологічних параметрів ВЦН, основні характеристики яких наведені в таблиці 3.4. Місце розміщення давачів – блок автоматики ГПА і безпосередньо технологічне обладнання.

Таблиця 3.4

**Основні характеристики давачів, використаних для проведення експериментальних досліджень на КС-39 «Прогрес»**

Назва вимірюваного Параметра	Тип приладу	Діапазон вимірювань	Клас точності
Тиск газу на вході ВЦН	Давачі фірми Honeywell - STG97L-F1G	0-100 кг/см <sup>2</sup>	0,1
Тиск газу на виході ВЦН	Давачі фірми Honeywell - STG97L-F1G	0-100 кг/см <sup>2</sup>	0,1
Температура газу на вході ВЦН	ТСП-1187	0-150 °С	0,5
Температура газу на виході ВЦН	ТСП-1187	0-150 °С	0,5
Кількість обертів валу ВЦН	ДТН-240	0-8000 об/хв	0,5
Температура газу на виході ТНТ	ТСП-1187	0-550 °С	0,5
Перепад тиску на конфузори	Давачі фірми Honeywell - STD120	0-1кг/см <sup>2</sup>	0,1

Функції вимірювання реалізуються технічними засобами АСК, що включають вторинні аналогові перетворювачі фірм «Analog Devices» серії 7В, призначені для перетворення вихідних сигналів давачів у напругу постійного струму 1-5 В.

Структурна схема вимірювального каналу з термоперетворювачем опору наведена на рисунку 3.1, на якій  $T$  – вимірювальний параметр, температура, °С,  $TO$  – термоперетворювач опору,  $R$  – опір термоперетворювачі, Ом,  $ЛЗ$  – лінія зв'язку,  $7B43$  – аналоговий перетворювач,  $Micro PC$  – контролер,  $ПК$  – персональний комп'ютер,  $FVT$  – бар'єр іскробезпеки (для схеми каналу з давачем, який встановлюють у вибухонебезпечному приміщенні).

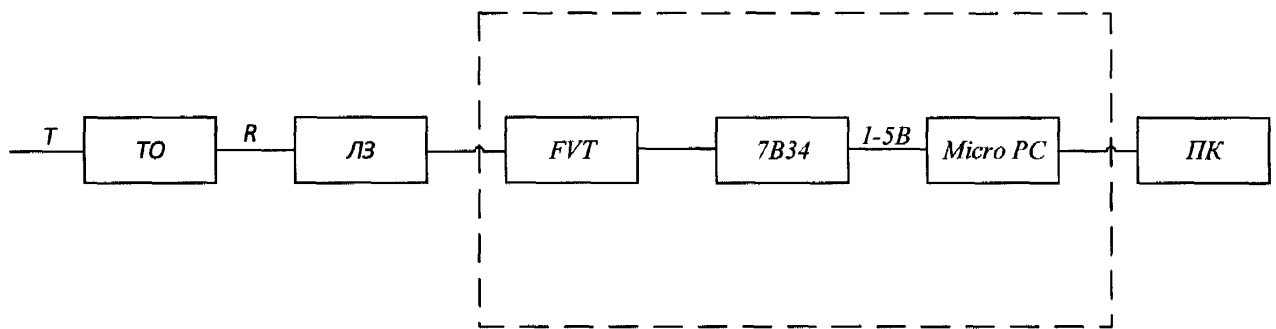


Рис. 3.1. Структурна схема вимірювального каналу

### 3.3 Розроблення методу контролю параметрів двоступеневого ВЦН природного газу

Застосування методів контролю та їхня реалізація в існуючому АСК КС дає можливість вчасно виявити несправності, які виникають під час експлуатації ВЦН, що в остаточному підсумку приводить до зменшення кількості аварій, підвищення надійності і продуктивності КС. Оскільки зміна технічного стану нагнітачів характеризується відхиленнями його параметрів від початкових значень, характерних для справного агрегату, то технічний стан проточної частини нагнітача визначаємо за зміною параметрів  $X_1$ ,  $X_2$  та  $X_3$ , які позначають як  $\Delta X_i$ ,

$i=1, 2, 3$ . Функціональна схема контролю параметрів технічного стану двоступеневого ВЦН зображена на рисунку 3.2.

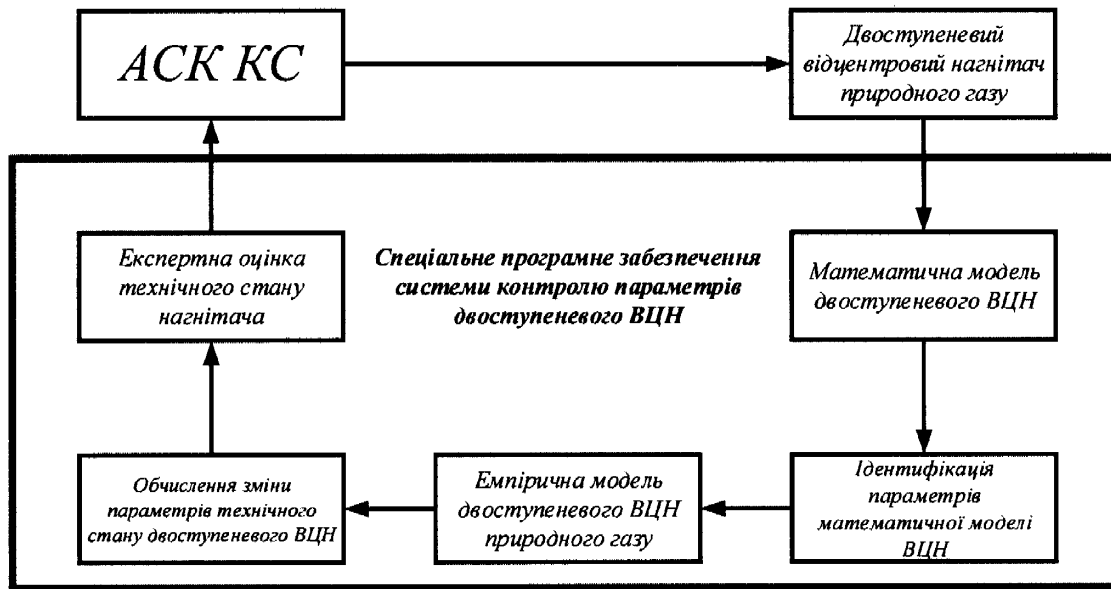


Рис. 3.2. Функціональна схема контролю параметрів двоступеневого ВЦН

АСК КС – сукупність апаратно-програмних засобів, що здійснюють контроль і керування технологічним процесом компримування газу. Вхідні параметри розробленого методу є перепад тиску на вхідному конфузорі ВЦН  $\Delta P$ , тиск газу на вході  $P_{вх}$  та виході  $P_{вих}$  ВЦН, температура газу на вході  $T_{вх}$  і виході  $T_{вих}$  ВЦН, атмосферний тиск  $P_a$ , кількість обертів ротора нагнітача  $n$ , а вихідними – параметри  $\Delta X_i$ .

### 3.3.1 Ідентифікація параметрів математичної моделі двоступеневого ВЦН природного газу із використанням генетичних алгоритмів та оптимізаційного методу Нелдера-Міда

Для визначення параметрів  $\Delta X_i$ , що проявляються після певного періоду роботи ВЦН, потрібно визначити  $X_i^{(0)}$ ,  $i = \overline{0,4}$  для нового (або після КР) нагнітача. Для їхнього визначення потрібно мати інформацію про значення величин  $\mu$  та  $k_T$ . Оскільки параметри  $\mu$  та  $k_T$ , що входять до лінеаризованої математичної моделі (2.32), розраховують із похибкою 10-20 %, постає завдання її ідентифікації. Ми

використовуємо МНК для ідентифікації математичної моделі (2.32), а для мінімізації функціоналу (2.36) з обмеженням (2.37) використаємо ГА та порівняємо його ефективність із оптимізаційним методом Нелдера-Міда.

Із використанням експериментальних даних, взятих за серпень 2011 року, а саме після КР ЕГПА-25РЧ на КС-39 «Прогрес», було створене програмне забезпечення ідентифікації параметрів двоступеневого ВЦН природного газу у середовищі MatLab із використанням ГА та оптимізаційного методу Нелдера-Міда (додатки Г і Д).

Для уточнення результатів і зменшення часу обчислення ГА, використовуючи формулу (2.35) та експериментальні графіки [15], що відображають залежність коефіцієнта  $k_T$  від числа Рейнольдса, відношення бокового зазору та шорсткості поверхонь дисків, встановимо межі обчислення параметрів  $\mu$  та  $k_T$ :  $0,6 \leq \mu \leq 1,18$ ,  $0,3 \leq k_T \leq 1,8$ .

Для налаштування ГА використано функцію *gaoptimset*. Установлено такі значення параметрів ГА: кількість особин у популяції рівна 1000, кількість поколінь рівна 70, початковий відрізок – [0,3; 1,18], ймовірність кросинговера рівна 0,8, вид кросинговера – випадковий, кількість особин поточної популяції, що буде скопійована в наступне покоління, рівна двом, частина мігрувальних осіб для кожної підпопуляції становить 0,01, нижні межі рішень ГА – [0,3; 0,6], верхні межі рішень ГА – [1, 8; 1, 18].

Адекватність математичної моделі (2.31) оцінено за допомогою коефіцієнта кореляції  $K_{y_y}$  та середньоквадратичного відхилення  $\sigma_{y_y}$ , які визначено таким чином [105]:

$$K_{y_y} = \frac{\sum_{i=1}^N Y \cdot y}{\sqrt{\sum_{i=1}^N (Y)^2 \cdot \sum_{i=1}^N (y)^2}}, \quad (3.2)$$

де  $y = Q_1$ ,  $Y = Q_{\text{вс}}$  – розрахункові і експериментальні значення об'ємної продуктивності ВЦН природного газу;

$N$  – кількість точок відліку.

$$\sigma_{y_y} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (Y - y)^2}{N - 1}}. \quad (3.3)$$

Результати роботи розробленого програмного забезпечення наведені в таблиці 3.5 та на рисунку 3.3. Як бачимо, використання генетичних алгоритмів для ідентифікації параметрів математичної моделі двоступеневого нагнітача природного газу порівняно з оптимізаційним методом Нелдера-Міда є більш ефективним, оскільки забезпечує кращу збіжність експериментальних значень  $Y$  до розрахункових  $y$ .

### 3.3.2 Синтез емпіричної моделі двоступеневого ВЦН природного газу на засадах генетичних алгоритмів

Для обчислення параметрів  $\Delta X_i$ , крім значень  $X_i^{(0)}$ ,  $i = \overline{0,4}$  необхідно мати значення об'ємної продуктивності  $Q_j^{(\text{count})}$ , що перераховані до умов  $Q_j^{(0)}$ . Для цього в розділі 2 запропоновано побудувати емпіричну модель нагнітача у вигляді полінома (2.39) із відомим максимальним степенем  $m$ .

Для синтезу емпіричної математичної моделі (2.39) використано удосконалений індуктивний метод самоорганізації моделей, де вибір структури моделі базується на принципах генетичних алгоритмів.

Для реалізації даного методу використано програмне забезпечення, розроблене автором праці [97], яке наведене у додатку Е. Визначення моделі за алгоритмом оптимальної складності відбувається у такі два етапи:

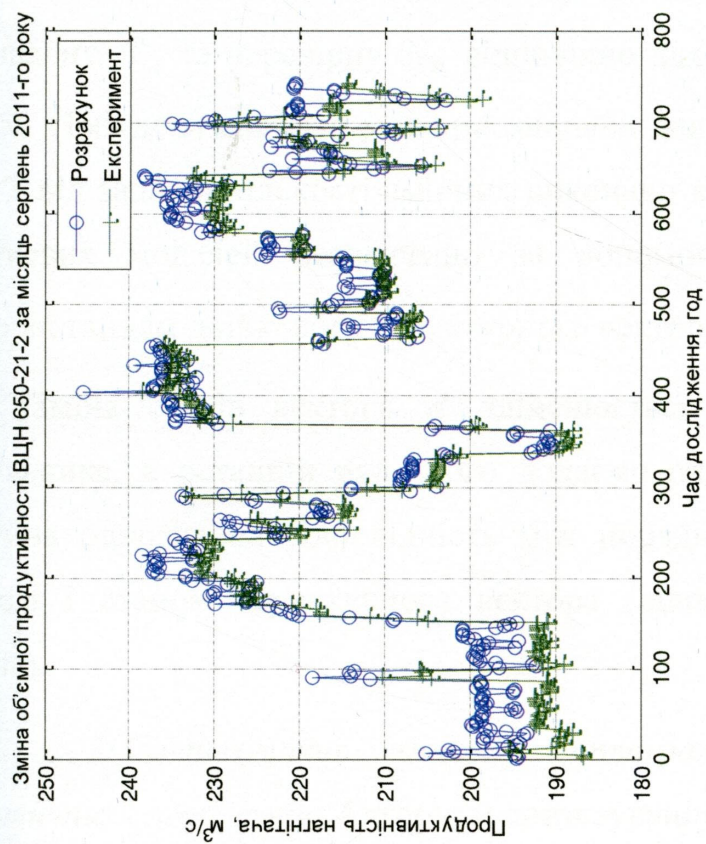
1. *Генерування часткових моделей різної складності.* Експериментальні дані, що входять до емпіричної моделі (2.39), приводимо до безрозмірного вигляду за формулами (2.41) та (2.42).



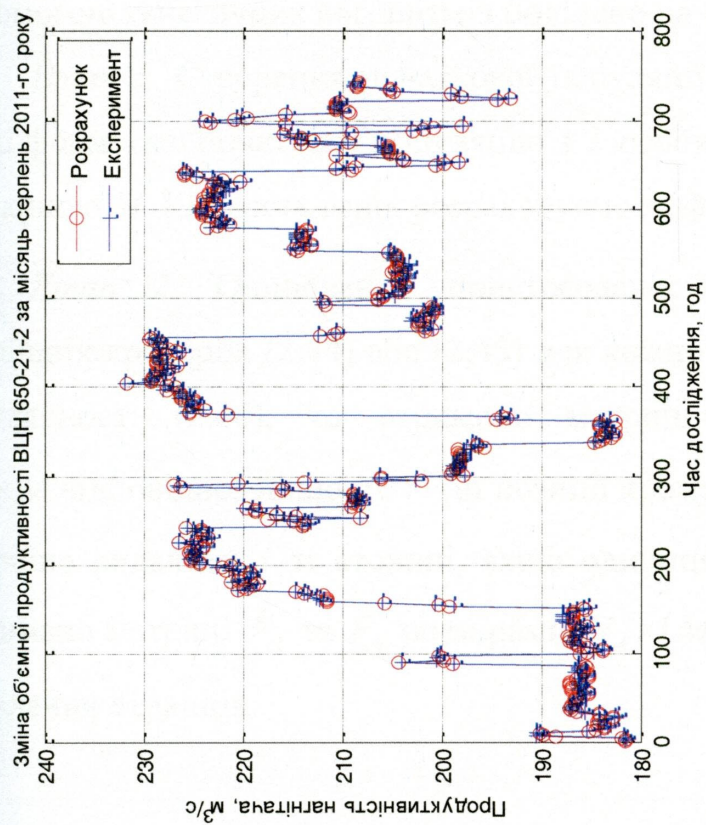
Таблиця 3.5

**Основні результати методів параметричної ідентифікації параметрів  
двоступеневого нагнітача природного газу**

<i>Результат параметричної ідентифікації параметрів двоступеневого нагнітача природного газу із використанням генетичних алгоритмів</i>		
Параметри математичної моделі двоступеневого нагнітача природного газу $X_i^{(0)}$ , що відповідають умовам роботи ВЦН після КР	$X_0^{(0)}$	37,7751
	$X_1^{(0)}$	18,1741
	$X_2^{(0)}$	26,4650
	$X_3^{(0)}$	0,5801
	$X_4^{(0)}$	33,0599
Коефіцієнт корегування кінцевої остаточної кількості лопаток	$\mu$	0,7569
Коефіцієнт, значення якого залежить від технології обробки лопаток колеса нагнітача	$k_T$	1,8
Оцінка адекватності математичної моделі двоступеневого нагнітача природного газу (2.31)	Коефіцієнт кореляції $K_{yy}$	0,9996
	Середньоквадратичного відхилення $\sigma_{yy}$	0,4390
<i>Результат параметричної ідентифікації параметрів двоступеневого нагнітача природного газу з використанням методу Нелдера-Міда</i>		
Параметри математичної моделі двоступеневого нагнітача природного газу $X_i^{(0)}$ , роботи ВЦН після КР	$X_0^{(0)}$	42,5321
	$X_1^{(0)}$	20,4694
	$X_2^{(0)}$	29,7983
	$X_3^{(0)}$	0,5889
	$X_4^{(0)}$	32,1851
Коефіцієнт корегування кінцевої остаточної кількості лопаток	$\mu$	0,6578
Коефіцієнт, значення якого залежить від технології обробки лопаток колеса нагнітача	$k_T$	1,8
Оцінка адекватності математичної моделі двоступеневого нагнітача природного газу (2.31)	Коефіцієнт кореляції $K_{yy}$	0,9893
	Середньоквадратичного відхилення $\sigma_{yy}$	4,2614



а) генетичні алгоритми



б) метод Нелдера-Міда

Рис. 3.3. Графічні результати методів параметричної ідентифікації параметрів двоступеневого нагнітача природного газу

Отримані матриці вхідних  $x_j^{(i)}$  та вихідних даних  $y_i$  ділимо на дві множини: навчальну  $N_A$  та перевірну  $N_B$  відповідно для кожного критерію селекції (2.44) та (2.45). Побудова системи умовних рівнянь для повного полінома заданого степеня  $m=3$  від заданої кількості змінних виконано в програмі *fod*. Формування структур часткових моделей реалізовано за допомогою програми *regi* і виконано з використанням двійкового структурного вектора  $d = (d_1, d_2, \dots, d_n)$  [93].

Зміна станів вектора  $d$  здійснюється за принципом роботи двійкового лічильника, в останній ряд якого додаємо одиницю. При цьому має зберігатись взаємна однозначна відповідність між порядковим номером наступної часткової моделі і станом структурного вектора (відповідність десятичного і двійкового числа).

*2. Синтезування моделей оптимальної складності за допомогою генетичних алгоритмів.* Алгоритм синтезування моделей оптимальної складності за допомогою генетичних алгоритмів поділено на такі етапи [85]:

*Етап 1.* Створення початкової популяції (програма *Population*). На першому етапі формуємо початкову популяцію з  $I$  особин, в якій усі особини є хромосомами довжиною  $M$ . Кількість генів розраховуємо за формулою (2.43).

*Етап 2.* Оцінювання пристосованості хромосом. Обчислено значення зовнішніх критеріїв (2.44) або (2.45) для кожної хромосоми. Коли вибрано критерій регулярності (2.44), то отримали матриці  $F_A$  і  $F_B$  розмірами  $N_A \times M$  і  $N_B \times M$  відповідно. Якщо на  $i$ -тій позиції хромосоми є нуль, то із матриць  $F_A$  та  $F_B$  потрібно видалити  $i$ -ті стовпці, якщо одиниця – відповідні стовпці не змінюємо. Отримано матриці  $\tilde{F}_A$  та  $\tilde{F}_B$  розмірами  $N_A \times (M - c)$  і  $N_B \times (M - c)$ , де  $c$  – кількість видалених стовпців.

Для обчислення ненульових коефіцієнтів  $a_{Aj}$ ,  $j = \overline{1, M-c}$  моделі (2.39) на навчальній множині  $N_A$  розв'язано нормальне рівняння Гаусса (програма *fun\_Gauss*), що видозмінюється таким чином [106]:

$$\tilde{M}_{F,A} \bar{a}_A = \tilde{F}_A^T \bar{Y}_A, \quad (3.4)$$

де  $\bar{a}_A = (a_{A0}, a_{A1}, \dots, a_{A, M-c-1})^T$  – вектор ненульових коефіцієнтів моделі, пов'язаний з наступною хромосою;

$\bar{Y}_A = (Y^{(1)}, Y^{(2)}, \dots, Y^{(N_A)})$  – вектор експериментальних значень на множині  $N_A$ .

На перевірній множині точок  $N_B$  обчислено значення [106]:

$$\bar{y}(B) = \tilde{F}_B \bar{a}_A. \quad (3.5)$$

За знайденими значеннями  $\bar{y}(B)$  із використанням формули (2.44) обчислено значення функції пристосування  $\Delta_j^2(B)$ ,  $j = \overline{1, I}$  для кожної хромосоми початкової популяції.

Якщо вибрано критерій зміщення (2.45), то отримано рівняння (3.4), яке необхідно розв'язати методом Гаусса відносно параметрів  $\bar{a}_A$ . За формулою (2.45) обчислено значення  $\bar{y}(A) = \tilde{F}_A \bar{a}_A$ . За відомими значеннями  $\bar{y}(A)$  і  $\bar{y}(B)$  знайдено значення  $\Delta_j^2(A, B)$ ,  $j = \overline{1, I}$  для кожної хромосоми.

*Етап 3.* Перевірка умов зупинки алгоритму.

Обчислено [107]:

$$\Delta_m^2(B) = \min_j \Delta_j^2(B), \quad (3.6)$$

$$\Delta_m^2(A, B) = \min_j \Delta_j^2(A, B). \quad (3.7)$$

Обчислення зупинено тоді, коли мінімальні значення (3.6) або (3.7) критеріїв селекції (2.44) або (2.45) не перевищують заданого значення  $E$ .

Також обчислення зупиняють коли відсутнє помітне зменшення значень функцій пристосування або вже виконана задана кількість ітераційних кроків.

Після виконання перевірки умов зупинки алгоритму із наступної популяції вибрано хромосому  $ch^*$ , яка визначає структуру моделі оптимальної складності. Із початкової популяції вилучаємо нульові стовпці. В результаті отримали матрицю  $F^*$ . Здійснено перерахунок коефіцієнтів моделі (2.39) із використанням МНК (програма *fun\_parametr*).

*Етап 4.* Відбір хромосом.

Із використанням знайдених на другому етапі алгоритму значень функцій пристосування (2.44) або (2.45) відібрано хромосоми для нової популяції. Селекцію хромосом виконано турнірним методом [107].

*Етап 5.* Створення нової популяції.

Після селекції хромосом на четвертому етапі алгоритму застосовують оператори схрещування та мутації. Вірогідність схрещування ( $0 \leq P_c \leq 1$ ) набагато більша, ніж вірогідність мутації ( $0 \leq P_m \leq 0,1$ ), тому оператор схрещування застосовують частіше порівняно з оператором мутації. Оператор мутації реалізовано шляхом заміни одиниці на нуль і навпаки.

Для кожного гена задано вірогідність мутації шляхом вибору випадкового числа із інтервалу  $[0;0,1]$ . Оператор мутації застосовано тоді, коли вибране випадкове число виявиться меншим або рівним  $P_c$ . Оператор схрещування застосовано тоді, коли виконується умова  $P_z \leq P_c$ , де  $P_z$  – випадкове число із інтервалу  $[0;1]$ .

При застосуванні оператора схрещування для пари хромосом, необхідно визначити точку схрещування – локус. Точкою схрещування може бути випадкове натуральне число, значення якого буде меншим від числа генів  $M$  кожної хромосоми. Як результат дії оператора схрещування отримаємо нову пару нащадків.

Реалізація генетичного алгоритму синтезу емпіричних моделей оптимальної складності показала, що значна частина машинного часу витрачається на

розв'язування системи лінійних алгебраїчних рівнянь (3.4), тому оптимальним розв'язком даної системи рівнянь буде розпаралелення методу Гаусса [108-109].

Нормальне рівняння (3.4) запишемо у такій формі [110]:

$$\tilde{A}\bar{a}_A = \tilde{b}, \quad (3.8)$$

де  $\tilde{A} = \tilde{M}_{F,a}$ ;  $\tilde{b} = \tilde{F}_A^T \bar{Y}_A$ .

Рівняння (3.4) розв'язуватимемо методом гаусового виключення, де система (3.8) приводиться до верхньої діагональної форми за такими формулами [110]:

$$\tilde{a}_{i\bar{j}}^{(i)} = \frac{\tilde{a}_{i\bar{j}}^{(i-1)}}{\tilde{a}_{ii}^{(i-1)}}, \quad i = \overline{1, M-c}; \quad (3.9)$$

$$\tilde{a}_{k\bar{j}}^{(i)} = \tilde{a}_{k\bar{j}}^{(i-1)} - \tilde{a}_{i\bar{j}}^{(i)} \tilde{a}_{kj}^{(i-1)}, \quad k = \overline{i+1, M-c}, \quad j = \overline{1, M-c+1}, \quad (3.10)$$

де  $\tilde{a}_{i\bar{j}}^{(i)}$ ,  $\tilde{a}_{k\bar{j}}^{(i)}$  –  $i$ -тий та  $k$ -тий рядок розширеної матриці, що утворена шляхом приєднання до матриці  $\tilde{A}$  вектор-стовпця  $\tilde{b}$ ;  $\tilde{a}_{i\bar{j}}^{(0)} = \tilde{a}_{i\bar{j}}$ ,  $i = \overline{1, M-c}$ ;  $\tilde{a}_{k\bar{j}}^{(0)} = \tilde{a}_{k\bar{j}}$ ,  $k = \overline{i+1, M-c}$ .

В обчислювальному процесі цикл за індексом  $k$  є внутрішнім щодо зовнішнього циклу за індексом  $i$ . Результатом застосування ітераційних процедур (3.9) і (3.10) є верхня діагональна матриця з одиницями на головній діагоналі [110]:

$$U = \begin{bmatrix} 1 & u_{12} & u_{13} & \cdots & u_{1, M-c} & u_{1, M-c+1} \\ 0 & 1 & u_{23} & \cdots & u_{2, M-c} & u_{2, M-c+1} \\ 0 & 0 & 1 & \cdots & u_{3, M-c} & u_{3, M-c+1} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ 0 & 0 & 0 & \cdots & 1 & u_{M-c, M-c+1} \end{bmatrix},$$

де  $u_{ij} = a_{ij}^{(i)}$ ,  $i = \overline{1, M-c}$ ,  $j = \overline{i+1, M-c+1}$ .

Отже, рівняння (3.8) перетвориться в еквівалентну систему лінійних алгебраїчних рівнянь

$$\tilde{U}\bar{a}_A = \bar{b}_A, \quad (3.11)$$

де  $\tilde{U}$  – квадратна матриця розміром  $M-c$ , що утворена із матриці  $U$  шляхом вилучення останнього стовпця;  $b_{A,i} = u_{i,M-c+1}$ ,  $i = \overline{1, M-c}$ .

Рівняння (3.8) розв'язують методом зворотної прогонки, починаючи з останнього рівняння. Очевидно, що [110]

$$a_{A,M-c} = b_{A,M-c}. \quad (3.12)$$

Інші значення  $a_{A,i}$  обчислюють за такою ітераційною процедурою [110]:

$$a_{A,i} = b_{A,i} - \sum_{j=i+1}^{M-c} u_{ij} a_{A,j}, \quad i = \overline{M-c-1, 1}. \quad (3.13)$$

У результаті отримують верхню діагональну матрицю з ненульовими коефіцієнтами на головній діагоналі, тобто  $u_{ii} \neq 0$ ,  $i = \overline{1, M-c}$ . У такому випадку для отримання розв'язку рівняння (3.8) необхідно праву частину співвідношення (3.13) розділити на  $u_{ii}$ .

Зазначене вище є справедливим і для  $LU$ -методу, відповідно до якого матрицю  $\tilde{A}$  подають у вигляді добутку двох матриць  $L$  і  $U_R$ . Перша з них – нижня діагональна з одиницями на головній діагоналі, а друга – верхня діагональна матриця. Потім прямою і зворотною прогонками розв'язують трикутні системи  $L\bar{y} = \bar{b}_A$ ,  $U_R\bar{a}_A = \bar{y}$  [111].

Іншим способом зменшення затрат машинного часу є розпаралелення алгоритму приведення матриці  $\tilde{A}$  до верхньої трикутної матриці  $U$ . На цю операцію витрачається більша частина часу з всієї частки часу, яка витрачається на розв'язування системи рівнянь (3.8).

Суть такого алгоритму у наступному [107]. На стадії ініціалізації (початковій стадії) вся матриця  $\tilde{A}$  розміщується у робочому просторі першого процесу – майстра. Перший крок – майстер відправляє, по можливості, рівні шари матриці  $\tilde{A}$  іншим процесам (робітникам) так, що кожний із процесів, включаючи і перший отримує підматриці  $\tilde{A}_i^{(1)}$ ,  $i = \overline{0, q-1}$ , де  $q$  – загальна кількість процесів. Після

відправки майстер нормує перший рядок своєї підматриці  $\tilde{A}_0^{(1)}$  за формулою (3.9) і тут же відсилає значення  $\tilde{a}_{10}^{(1)}$  іншим робітникам. Робітники, отримавши рядок, перераховують елементи своїх підматриць, включаючи і елемент  $\tilde{a}_{qi, M-c+1}$ . Одночасно майстер обчислює нові значення елементів за формулою (3.10), 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  $\tilde{a}_{21}^{(2)}$ , яке обчислене за формулою (3.9), посилає всім робітникам. Ті, одночасно з майстром, модифікують свої підматриці у відповідності з процедурою (3.12). Причому майстер змінює індекс  $k$  від 3 до  $M-c$ , а робітники відповідно від 2 до  $M-c$ . У підсумку довжина другого рядка з ненульовими елементами скоротилася на одиницю (перший елемент дорівнює нулю, а другий – одиниці). Підматриці, які розміщені у робочих просторах робітників, будуть вміщувати по два нульових стовпці.

Процес модифікації елементів підматриць здійснюється циклічно за наведеною схемою до тих пір поки майстер не завершить приводити матрицю до верхнього діагонального вигляду. У підсумку після закінчення першого циклу 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.

На початку другого циклу робітники надсилають свої підматриці майстру, де відбувається їхнє об'єднання. Потім майстер об'єднану підматрицю розділяє на  $q$  частин і розсилає їх всім робітникам, включаючи і себе. Майстер нормує перший рядок своєї підматриці. При цьому провідним елементом буде перший ненульовий елемент першого рядка підматриці майстра. Модифікований перший рядок, у



відповідності з формулою (3.9), майстер розсилає всім робітникам, які модифікують свої рядки за формулою (3.10). У подальшому обчислення відбуваються так, як це було у першому циклі. Алгоритм продовжує працювати до тих пір поки розмір чергового шару, що підлягає відправленню, не перевищуватиме кількості процесів. Тоді майстер приводить під матрицю, 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 [107]. Програмна реалізація паралельного алгоритму наведена в додатку Е.

Результат синтезу емпіричної моделі (2.39), отриманий на основі експериментальних даних роботи ВЦН 650-21-2 протягом березня 2011 року (до початку капітального ремонту ЕГПА-25РЧ на КС-39 «Прогрес»), відтворює рисунок 3.4.

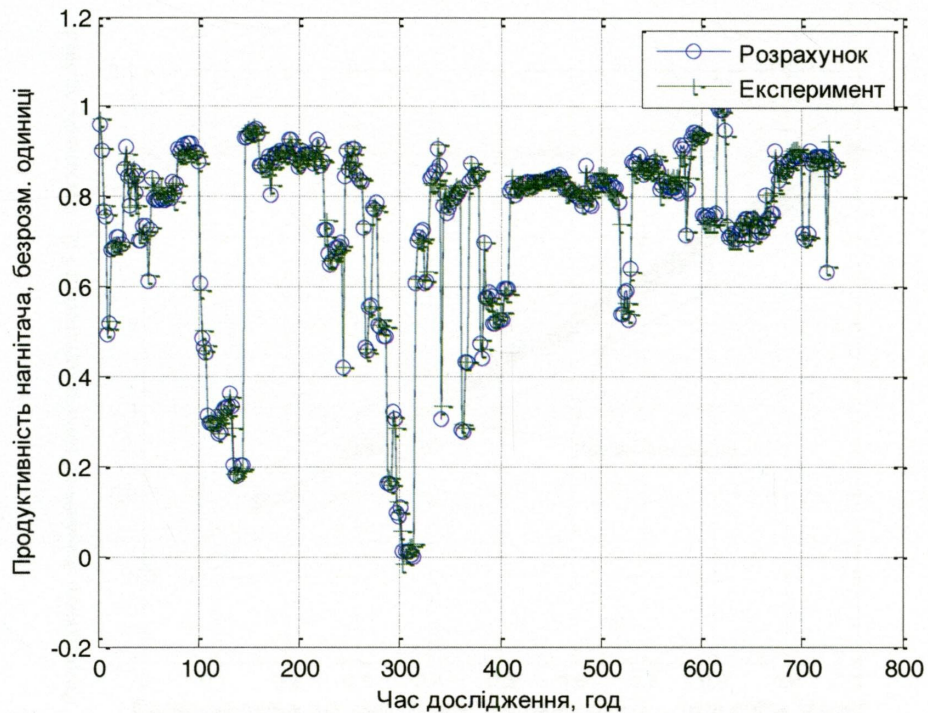


Рис. 3.4. Зміна об'ємної продуктивності ВЦН 650-21-2 за місяць березень 2011 року в безрозмірних одиницях

Були вибрані такі параметри програми: степінь полінома –  $n = 3$ , ймовірність схрещування  $p_c = 0,8$ , ймовірність мутації  $p_m = 0,01$ . Як критерій селекції було

вибрано критерій регулярності (2.44). Кількість членів полінома (2.39) при  $n=3$  – 84.

Адекватність моделі (2.39) перевіряли за допомогою коефіцієнта кореляції  $K_{Yy}$  та середньоквадратичного відхилення  $\sigma_{Yy}$ , які визначались відповідно за формулами (3.2) та (3.3). Було отримано:  $K_{Yy} = 0,9977$  та  $\sigma_{Yy} = 0,0478$  м<sup>3</sup>/с, що свідчить про достатній ступінь кореляції між експериментальними  $Y$  та розрахунковими значенням  $y$ .

На рисунку 3.5 відображено результати перевірки на адекватність емпіричної моделі (2.39). Пряма лінія регресії, побудована з використанням МНК, вказує на досить мале відхилення експериментальних значень  $Y$  від розрахункових значень  $y$ , що свідчить про достатню адекватність отриманої емпіричної моделі (2.39).

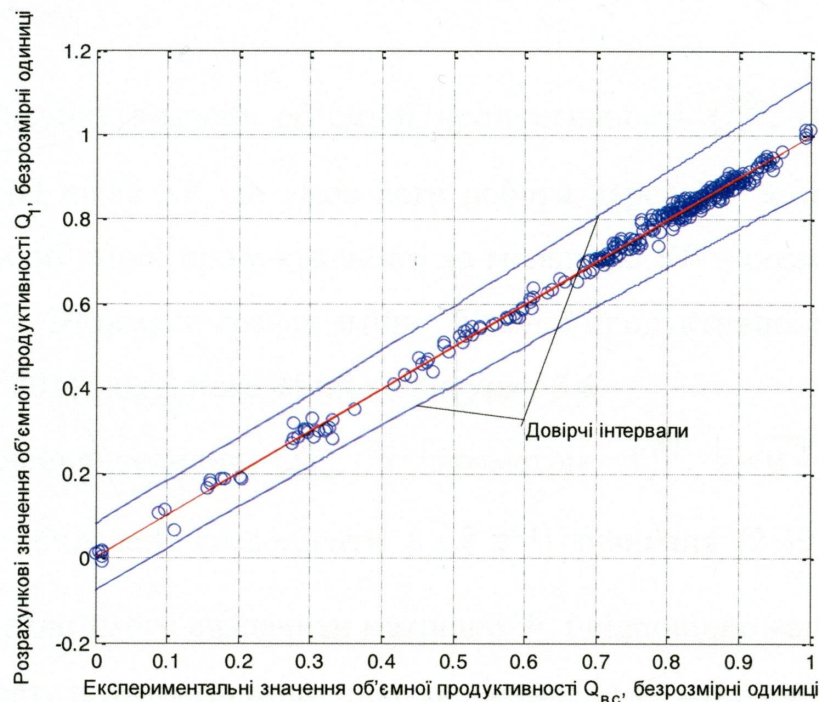


Рис. 3.5. Результати перевірки на адекватність емпіричної моделі

Рівняння лінії регресії між експериментальними  $Y$  і розрахунковими значеннями  $y$  має такий вигляд [105, 88]:

$$y = a_0 + a_1 \cdot Y, \quad (3.14)$$

де  $a_0 = 0,0981$ ;  $a_1 = 0,9792$ .

На рисунку 3.5 також нанесені довірчі інтервали, що побудовані з використанням формули [87]:

$$y - t_{1-\alpha/2} \cdot s_y \leq \eta \leq y + t_{1-\alpha/2} \cdot s_y, \quad (3.15)$$

де  $t_{1-\alpha/2}$  – безрозмірна статистика Стюдента, яка підпорядкована  $t$ -розподілу з  $N-2$  ступенями вільності;

$\alpha = 0,01$  – рівень значущості безрозмірної статистики Стюдента;

$$s_y^2 = \tilde{s}_y^2 \left( \frac{1}{N} + \frac{(Y_i - \bar{Y})^2}{\sum_{i=1}^N (Y_i - \bar{Y})^2} \right) - \text{оцінка дисперсії відносно лінії регресії,}$$

$$\text{де } \tilde{s}_y^2 = \frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (y_i - \bar{y})^2.$$

Після перерахунку значень об'ємної продуктивності  $Q_j^{(0)}$ , що відповідають умовам роботи ВЦН після КР, до умов його роботи перед КР за формулою (2.46) знайдемо значення об'ємної продуктивності за місяць до КР в розмірних одиницях за формулою (2.47). Отримали графік зміни об'ємної продуктивності ВЦН 650-21-2 за місяць березень 2011 року, показаний на рисунку 3.6.

Після визначення величин  $Q_{count,i}^{(o)}$  і параметрів  $X_i^{(0)}$ ,  $i = \overline{0,4}$  за формулами (2.33)-(2.35) були обчислені коефіцієнти  $\beta_i(\bar{X}, \bar{u}^{(j)})$  рівняння (2.49) у всіх точках спостережень, що дало змогу визначити матрицю  $F$  і відповідно варіації параметрів  $\Delta X_i$ ,  $i = 1, 2, 3$ . У результаті отримали такі значення:  $|\Delta X_1| = 0,2306$ ;  $|\Delta X_2| = 0,6514$ ;  $|\Delta X_3| = 0,0293$ . Відповідно отримали їхні відносні значення –  $\Delta x_1 = 1,2690 \%$ ,  $\Delta x_2 = 2,4613 \%$  і  $\Delta x_3 = 5,0552 \%$  (додаток Е).

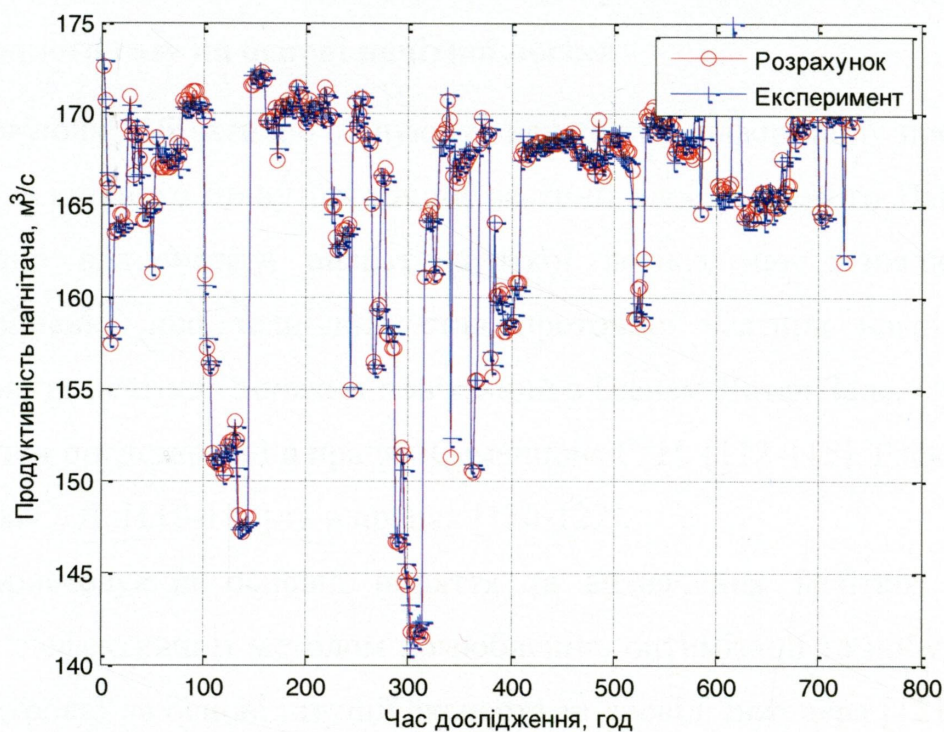


Рис. 3.6. Зміна об'ємної продуктивності ВЦН 650-21-2 за місяць березень 2011 року

Обґрунтування зв'язку між отриманими параметрами та станом проточної частини двоступеневого ВЦН природного газу наведені в таблиці 3.6.

Таблиця 3.6

**Обґрунтування впливу параметрів  $\Delta x_i$  на технічний стан проточної частини двоступеневого ВЦН природного газу**

Параметр	Приклад взаємозв'язку	Джерело
$\Delta x_1$	Цей параметр визначається через середню товщину і ширину лопаток першого РК двоступеневого ВЦН природного газу. Характеризує ерозійне зношення першої ступені стиснення газу нагнітача.	[14-21]
$\Delta x_2$	Цей параметр визначається через середню товщину і ширину лопаток другого РК двоступеневого ВЦН природного газу. Характеризує ерозійне зношення другої ступені стиснення газу нагнітача.	[14-21]
$\Delta x_3$	Цей параметр суттєво впливає на технічний стан проточної частини ВЦН, оскільки залежить від зміни радіального зазору покривального диску, збільшення якого має найбільший вплив на політропний к.к.д. ВЦН.	[77-78]

### 3.4 Система оцінювання технічного стану проточної частини двоступеневого ВЦН природного газу на основі нечіткої логіки

Враховуючи об'єктивно існуючу нечіткість інформації про об'єкт, для оцінювання технічного стану проточної частини двоступеневого ВЦН природного газу доцільно використати апарат нечіткої логіки, що дозволить ефективно прийняти рішення про технічний стан проточної частини нагнітача. Початок розвитку понять нечітких множин пов'язаний з іменем Лотфі Заде. Сучасні поняття нечіткої логіки представлені в працях Семенцова Г. Н. [112-115], Раскина Л. Г. [116-117], Штовба С. Д. [118-119] та в працях [120-122].

Використовуючи основні поняття та визначення нечіткої логіки (Fuzzy Logic), що є ефективним методом розроблення, оптимізації та побудови складних систем контролю на основі інтуїції експерта та досвіду інженера [121], синтезовано систему оцінювання технічного стану проточної частини двоступеневого ВЦН (рис. 3.7), що складається з окремих модулів.

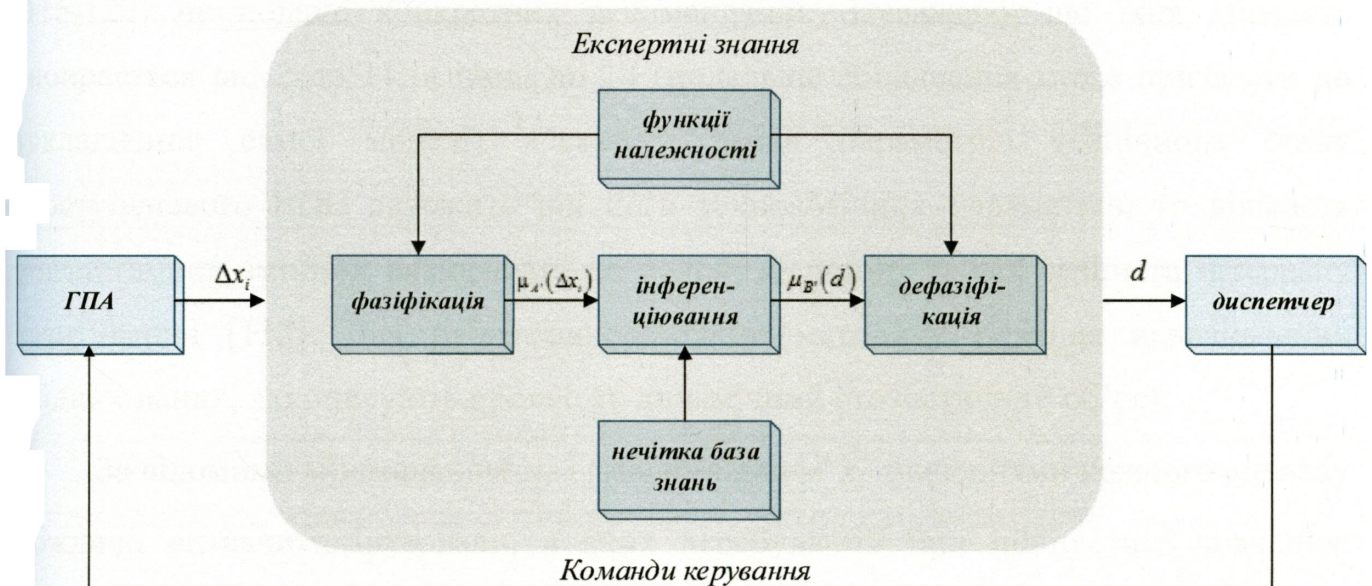


Рис. 3.7. Структура системи оцінювання технічного стану проточної частини двоступеневого ВЦН природного газу

Вхідною інформацією (рис. 3.7) синтезованої системи є відносні значення величин  $\Delta x_i$ , а вихідною змінною є змінна  $d$ , за значенням якої експерти оцінюють поточний стан проточної частини двоступеневого ВЦН. Згідно з дослідженнями [14], технічний стан ВЦН погіршується із зміною відповідних геометричних параметрів хоча б на 10 %, тому простір вхідних змінних  $\Delta x_i$  виражаємо у відсотках, а діапазон зміни вхідних параметрів  $\Delta x_i \in [0;10]$ ,  $i = \overline{1,3}$ .

Обробка вхідної інформації складається із таких основних етапів:

- **фазифікації** – знаходження значень і форми функцій належностей лінгвістичних змінних (термів) за відомими вхідними даними  $\Delta x_i$  та визначення кількості значень вибраних термів. Якщо  $A^k$ ,  $A^k \subseteq X$  – нечітка множина вхідних лінгвістичних змінних, то їхні функції належності позначимо як  $\mu_{A^k}(\Delta x_i)$ , де  $k$  – кількість лінгвістичних змінних.

Щодо визначення кількості лінгвістичних змінних  $k$  в розглянутій літературі [116-122] не подано конкретних рекомендацій. Зауважено, що їхня кількість вибирається від 2 до 11, а іноді до 14 (подальше збільшення може призвести до ускладнення самої моделі). Оскільки зміна параметрів технічного стану двоступеневого ВЦН залежить від його технологічних параметрів, то кількість лінгвістичних змінних визначаємо на основі діапазону їхньої зміни та інтервалу квантування [112]. Для цього використаємо методику подання невизначених вхідних даних, які описують процес як динамічний стохастичний об'єкт.

За відомими мінімальним  $\underline{x}_i$  і максимальним  $\overline{x}_i$  значеннями кожного сигналу можливо визначити інтервали, в яких перебувають їхні припустимі значення. Кожний інтервал розділимо на  $w$  відрізків [104]:

$$w_i = \frac{\overline{x}_i - \underline{x}_i}{R_i}, \quad (3.16)$$

де  $R_i$  – розмах контрольованого параметру.

Діапазони змін технологічних параметрів ВЦН передбачено такими:  $x^{(1)}$  – [4000; 6000];  $x^{(2)}$  – [2.5; 3.5];  $x^{(3)}$  – [3.5; 5.5];  $x^{(4)}$  – [0.01; 0.03];  $x^{(5)}$  – [280; 300];  $x^{(6)}$  – [300; 340].

Значення розмахів (рис. 3.8) приймаємо рівними:  $R_1 = 5200 - 4698 = 502$ ;  $R_2 = 3,3931 - 3,0489 = 0,3442$ ;  $R_3 = 4,5787 - 3,9472 = 0,6315$ ;  $R_4 = 0,0286 - 0,0226 = 0,0061$ ;  $R_5 = 296,5 - 290,8 = 5,7$ ;  $R_6 = 324,5 - 313,2 = 11,3$ .

Тоді кількість термів, потрібну для фазифікації вхідних параметрів у межах допуску, можна визначити за формулою (3.16). Результати розрахунків наведені у таблиці 3.7.

Таблиця 3.7

**Кількість термів, потрібна для фазифікації параметрів у межах допуску**

Назва параметра	Необхідна кількість термів
Кількість обертів валу ВЦН	3
Тиск газу на вході ВЦН	2
Тиск газу на виході ВЦН	3
Перепад тиску природного газу на конфузори ВЦН	3
Температура газу на вході ВЦН	3
Температура газу на виході ВЦН	3

Як видно з таблиці 3.7, для більшості параметрів необхідна кількість термів рівна 3. Тому для опитування експертів було використано розбиття усіх параметрів на три терми, що носять назву: відмінний (*prf*), нормальний (*norm*) та необхідне втручання (*n\_iter*) [125].

Функції належності  $\mu_{A^k}(\Delta x_i)$  можуть бути визначені із використанням різних методів: методу статистичної обробки експертної інформації, методу парних порівнянь, вдосконаленого методу парних порівнянь Сааті або з застосуванням стандартних функцій належності [114].

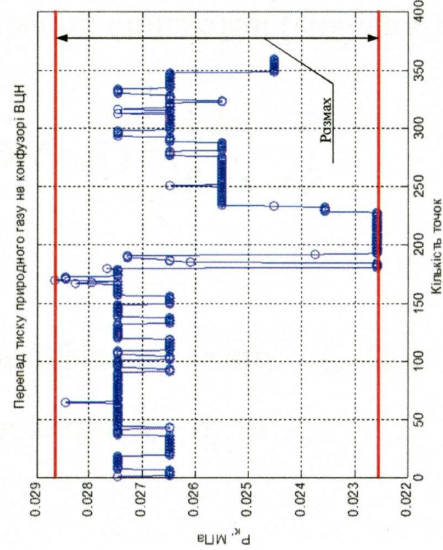
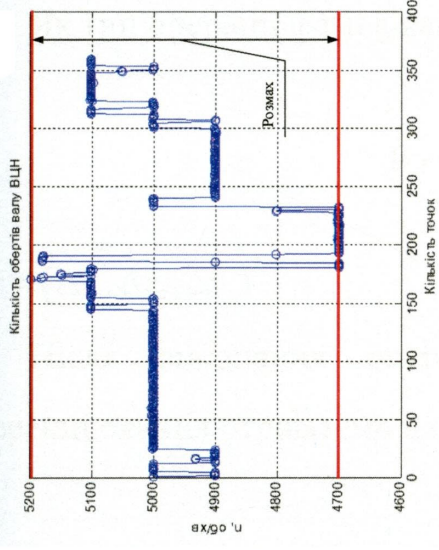
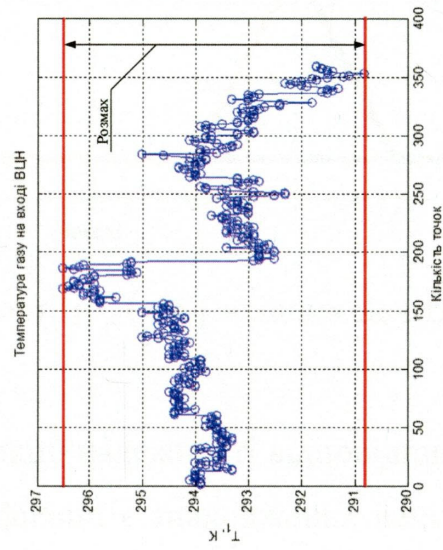
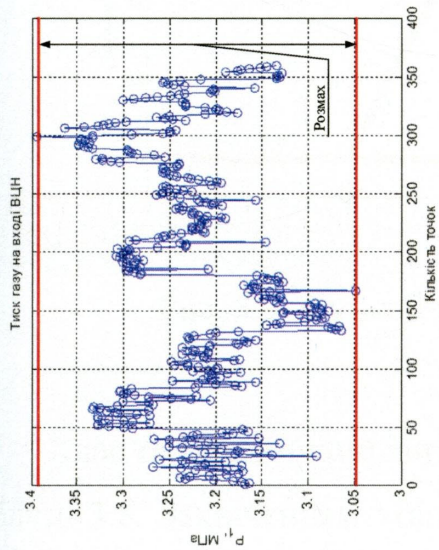
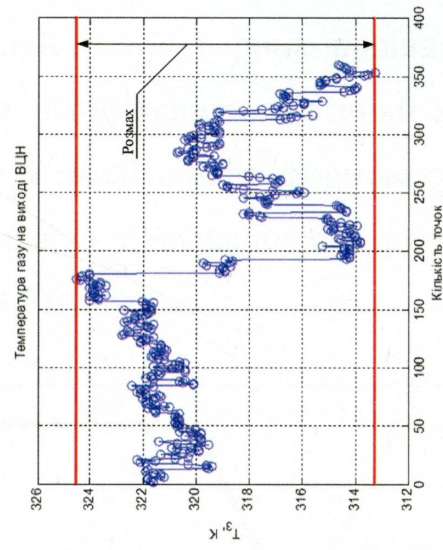
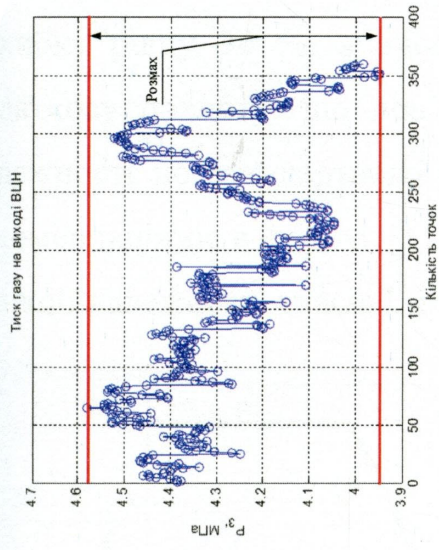


Рис. 3.8. Розмах параметрів



Оскільки методологія статистичної обробки експертної інформації містить похибку рівну 30 %, а вдосконалений метод парних порівнянь Сааті вводить додаткову похибку, що пов'язана із наближеним зведенням отриманої функції належності до стандартного вигляду з аналітичною формою запису, то згідно з рекомендаціями в роботі [114] вибираємо трапецеподібні функції належності та функції належності класів  $L$  і  $\gamma$  (рис. 3.9).

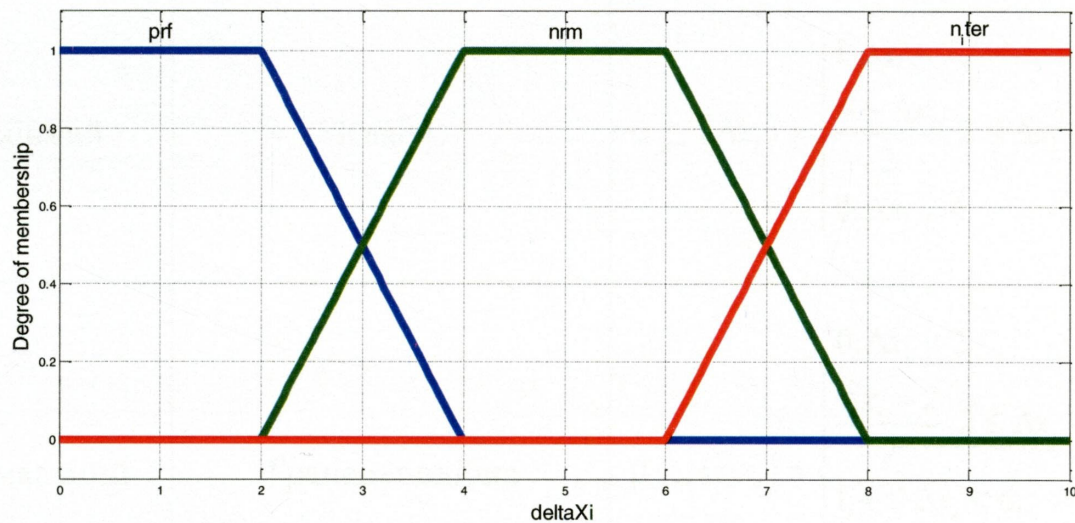


Рис. 3.9. Функції належності  $\mu_{A^k}(\Delta x_i)$  вхідних нечітких величин

Клас та аналітичний вигляд функції належності відповідних термів показані в таблиці 3.8. Закінченням етапу фазифікації є знаходження нечітких множин  $A'$  з функціями належності  $\mu_{A'}(\Delta x_i)$ .

Як тип операції фазифікації вибираємо синглетон (singleton) [122]:

$$\mu_{A'}(\Delta x_i) = \delta(\Delta x_i, \bar{x}) = \begin{cases} 1, \Delta x_i = \bar{x} \\ 0, \Delta x_i \neq \bar{x} \end{cases}, \quad (3.17)$$

де  $\bar{x} = (\Delta x_1, \Delta x_2, \Delta x_3)^T$ .

Після виконання операції фазифікації типу (3.17) на вході блоку інференціювання отримаємо нечіткі множини  $A'_1$ ,  $A'_2$  та  $A'_3$ :

$$\mu_{A_1}(\Delta x_1) = \delta(\Delta x_1 - \Delta \bar{x}_1), \mu_{A_2}(\Delta x_2) = \delta(\Delta x_2 - \Delta \bar{x}_2), \mu_{A_3}(\Delta x_3) = \delta(\Delta x_3 - \Delta \bar{x}_3). \quad (3.18)$$

Таблиця 3.8

Визначення функцій належності для вхідних змінних  $\Delta x_i, i=1, 2, 3$

Назва терму	Клас функцій належності	Аналітичний вигляд функцій належності
Відмінний	Клас L	$\mu_{A^{prf}}(\Delta x_i) = \begin{cases} 1, \Delta x_i < 2; \\ \frac{4 - \Delta x_i}{2}, 2 \leq \Delta x_i \leq 4; \\ 0, \Delta x_i > 4. \end{cases}$
Нормальний	Трапецеподібна	$\mu_{A^{nm}}(\Delta x_i) = \begin{cases} 0, \Delta x_i < 2; \\ \frac{\Delta x_i - 2}{2}, 2 \leq \Delta x_i < 4; \\ 1, 4 \leq \Delta x_i < 6; \\ \frac{8 - \Delta x_i}{2}, 6 \leq \Delta x_i \leq 8. \end{cases}$
Необхідне втручання	Клас $\gamma$	$\mu_{A^{n-iter}}(\Delta x_i) = \begin{cases} 0, \Delta x_i < 6; \\ \frac{\Delta x_i - 6}{2}, 6 \leq \Delta x_i \leq 8; \\ 1, \Delta x_i > 8. \end{cases}$

Результати фазифікації величин  $\Delta x_i, i=1, 2, 3$  наведено в таблиці 3.9.

- **інференціювання (агрегування, імплікація, акумулювання)** – логічна обробка нечітких даних, що надходять як від фазифікації, так і від бази правил, сформованих на основі експертних знань, і дають змогу встановити функціональну залежність між вихідним параметром  $d$  та вектор-аргументом  $\bar{x}$  [113]:

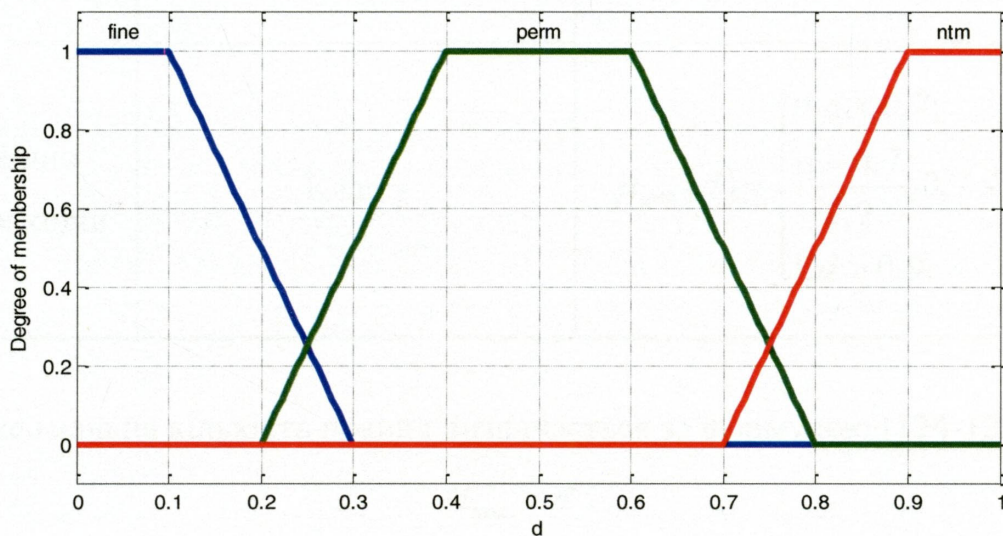
$$d = f(\bar{x}). \quad (3.19)$$

Таблиця 3.9

Фазифікація вхідних лінгвістичних змінних  $\Delta x_i, i=1, 2, 3$ 

Лінгвістична змінна	Значення вхідних змінних	Значення функції належності	Терм
Параметр $\Delta x_1$	1,2690 %	1	«prf» (відмінний)
Параметр $\Delta x_2$	2,4613 %	0,76935	«prf» (відмінний)
Параметр $\Delta x_3$	5,0552 %	1	«nrm» (нормальний)

Якщо  $B^m \subseteq D$  – нечітка множина вихідних лінгвістичних змінних,  $m$  – кількість термів вихідної змінної,  $D$  – простір вихідних змінних, то  $\mu_{B^m}(d)$  – відповідні функції належності на виході (рис. 3.10). Вихідна змінна  $d$  характеризується трьома термами: нормальний (*fine*), допустимий (*perm*) та необхідно вжити заходів (*ntm*).

Рис. 3.10. Функції належності  $\mu_{B^m}(d)$  для термів нечіткої змінної  $d$

Клас та аналітичний вигляд функції належності відповідних термів для вихідної змінної  $d$  показані в таблиці 3.10.

Таблиця 3.10

**Визначення функцій належності для вихідної змінної  $d$**

Назва терму	Клас функцій належності	Аналітичний вигляд функцій належності
Нормальний	Клас L	$\mu_{B^{fine}}(d) = \begin{cases} 1, & d < 0,1; \\ \frac{0,3-d}{0,2}, & 0,1 \leq d \leq 0,3; \\ 0, & d > 0,3. \end{cases}$
Допустимий	Трапецеподібна	$\mu_{B^{perm}}(d) = \begin{cases} 0, & d < 0,2; \\ \frac{d-0,2}{0,2}, & 0,2 \leq d < 0,4; \\ 1, & 0,4 \leq d < 0,6; \\ \frac{0,8-d}{0,2}, & 0,6 \leq d \leq 0,8. \end{cases}$
Необхідно вжити заходів	Клас $\gamma$	$\mu_{B^{nm}}(d) = \begin{cases} 0, & d < 0,7; \\ \frac{d-0,7}{0,2}, & 0,7 \leq d \leq 0,9; \\ 1, & d > 0,9. \end{cases}$

Максимальна кількість правил визначається за формулою [124-125]

$$N_{\max} = n^k. \quad (3.20)$$

Враховуючи те, що  $k=3$  і  $n=3$ , маємо  $N_{\max} = 27$ . Припустимо, що відповідні правила  $R^{(N)}$  пов'язані між собою логічним оператором «AND», тоді використовуємо нечіткі правила типу *modus ponens* зі скалярним виходом у формі [123]:

$$R^{(N)}: \text{IF } (\Delta x_1 \text{ це } A_1^k \text{ AND } \Delta x_2 \text{ це } A_2^k \text{ AND } \Delta x_3 \text{ це } A_3^k) \text{ THEN } (d \text{ це } B^m). \quad (3.21)$$

Правила (3. 21) можна представити у вигляді нечіткої імплікації [122]:

$$R^{(N)}: A_1^k \times A_2^k \times A_3^k \rightarrow B^m, \quad (3.22)$$

де  $A_1^k, A_2^k, A_3^k \subseteq X$ ,  $B^m \subseteq D$ .

Для представлення отриманої бази правил у робочій області MatLab використовується спеціальний цифровий формат. Всі правила системи нечіткого висновку подані у формі матриці, в якій кожному рядкові відповідає окреме правило. Перші  $m = 3$  стовпці відносять до вхідних змінних системи, причому номер стовпця має відповідати номеру терма для відповідної вхідної змінної. Наступні  $n = 1$  стовпці відносять до вихідних змінних системи нечіткого висновку. Кожний стовпець також має номер, що відповідає номеру функції належності для вихідної змінної. Стовпець з номером  $m+n+1$  містить ваговий коефіцієнт окремого правила. Вагові коефіцієнти можуть набувати будь-яких значень між нулем і одиницею, в даному випадку всі вагові коефіцієнти рівні одиниці. Стовпець номером  $m+n+2$  містить число 1, якщо для підумови цього правила використовується нечіткий оператор *AND*, або кількість 2, якщо використовується нечіткий оператор *OR*.

За допомогою експертів, у ролі яких використовували технологів-операторів компресорних станцій, сформована база правил, котру можна представити у вигляді таблиці 3.11, згідно з якою перше правило нечіткого висновку можна інтерпретувати так: «Якщо перша вхідна змінна  $\Delta x_1$  набуває значення першого терму і друга вхідна змінна  $\Delta x_2$  набуває значення першого терму і третя вхідна змінна  $\Delta x_3$  приймає

Таблиця 3.11

**База правил оцінювання технічного стану проточної частини  
двоступеневого ВЦН**

Порядковий номер правила	$\Delta x_1$	$\Delta x_2$	$\Delta x_3$	$d$	$w$	Нечіткий оператор
1	1	1	1	1	1	1
2	1	1	2	2	1	1
3	1	1	3	3	1	1
4	1	2	1	2	1	1
5	1	3	1	3	1	1
6	2	1	1	2	1	1
7	3	1	1	3	1	1
8	2	2	2	2	1	1
9	2	2	3	3	1	1
10	2	2	1	2	1	1
11	2	1	2	2	1	1
12	2	3	2	3	1	1
13	1	2	2	2	1	1
14	3	2	2	3	1	1
15	3	3	3	3	1	1
16	2	3	3	3	1	1
17	1	3	3	3	1	1
18	3	1	3	3	1	1
19	3	2	3	3	1	1
20	3	3	1	3	1	1
21	3	3	2	3	1	1
22	1	2	3	3	1	1
23	1	3	2	3	1	1
24	2	1	3	3	1	1
25	2	3	1	3	1	1
26	3	1	2	3	1	1
27	3	2	1	3	1	1

значення першого терму, то вихідна змінна  $d$  набуває значення першого терму. При цьому ваговий коефіцієнт  $w$  даного правила рівний 1».

Правила (3.22) можна інтерпретувати як нечітке відношення на множині  $X \times D$ , в якому  $R^{(N)} \subseteq X \times D$  – нечітка множина із наступною функцією належності:

$$\mu_{R^{(N)}}(\Delta x_i, d) = \mu_{A_1^k \times A_2^k \times A_3^k \rightarrow B^m}(\Delta x_i, d). \quad (3.23)$$

Результати дії умов, які стоять у правилах (3.22) після слова «IF» необхідно відповідним методом об'єднати, тобто визначити степені істинності всіх умов в усіх правилах. Правило активується, якщо істинність його умови більша за нуль. Ця процедура виконується на етапі *агрегування* із використанням операції нечіткої кон'юкції (нечітке «AND») [113].

Результатом виконання цього етапу буде множина  $\bar{B}^m \subseteq D$ , функцію належності якої знаходимо за такою формулою:

$$\mu_{\bar{B}^m}(d) = \sup_{\Delta x_i} \left[ \min \left( \mu_{A^k}(\Delta x_i), \mu_{R^{(N)}}(\Delta x_i, d) \right) \right]. \quad (3.24)$$

Наступним етапом інференціювання є процедура *імплікації* – знаходження вагових коефіцієнтів правил (3.21) та визначення функції належності  $\mu_{A^k \rightarrow B^m}(\Delta x_i, d)$  нечіткої імплікації (3.22).

Як відомо, вагові коефіцієнти правил впливають на результат нечіткого логічного висновку. У зв'язку з цим необхідно підібрати такі значення вагових коефіцієнтів правил, які забезпечать найкращу якість нечіткої бази знань (3.22). Підбирання вагових коефіцієнтів вирішується шляхом розв'язання відповідної задачі оптимізації, в якій цільовою функцією є якість нечіткої бази знань, а керованими змінними є вагові коефіцієнти правил  $w_k$ ,  $k = \overline{1, 27}$  [126]. Обмеженням задачі оптимізації є те, що керовані змінні перебувають у діапазоні  $[0, 1]$ .

Якщо  $\bar{w}$  – вектор керованих змінних, а  $C(\bar{w})$  – критерій якості нечіткої бази знань, то задача оптимізації нечіткої бази знань полягає в тому, щоб знайти такий вектор  $\bar{w}$ , щоб [126]

$$C(\bar{w}) = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1, n} (d - F(\bar{w}, \bar{x}))^2} \rightarrow \min, \quad (3.25)$$

де  $F(\bar{w}, \bar{x})$  – результат нечіткого логічного висновку з параметрами  $\bar{w}$  при значеннях вхідних змінних  $\bar{x}$ .

Оскільки всі висновки правил (3.21) задані у формі нечітких лінгвістичних висловів першого роду, то як нечітку імплікацію (3.22) використовуємо правило типу minimum (правило Мамдані):

$$\mu_{A_1^k \times A_2^k \times A_3^k \rightarrow B^m}(\Delta x_i, d) = \mu_{A^k}(\Delta x_i) \wedge \mu_{B^m}(d) = \min[\mu_{A^k}(\Delta x_i), \mu_{B^m}(d)]. \quad (3.26)$$

*Акумуляція* висновків нечітких правил продукцій (3.21), тобто, визначення значення функції належності для терму вихідної змінної виконується із використанням операції мах-диз'юнкції, що приводить у результаті до нечіткої множини, функцію належності якої запишемо таким чином:

$$\mu_{B^m}(d) = \max_{N=27} \left\{ \min[\mu_{A^k}(\Delta x_i), \mu_{B^m}(d)] \right\}. \quad (3.27)$$

Оскільки контроль параметрів двоступеневого ВЦН природного газу здійснюється із використанням понять нечіткої логіки, то в середовищі MatLab було створене спеціальне програмне забезпечення (додаток Ж). Структура типу Мамдані системи оцінювання технічного стану проточної частини двоступеневого ВЦН зображена на рисунку 3.11. Як бачимо, нечітка база знань містить двадцять сім правил. Для прикладу розглянемо два з них ( $N = 2$ ):

$$R^{(1)}: \text{IF } (\Delta x_1 \text{ це } A_1^{prf} \text{ AND } \Delta x_2 \text{ це } A_2^{prf} \text{ AND } \Delta x_3 \text{ це } A_3^{prf}) \text{ THEN } (d \text{ це } B^{well})$$

$$R^{(2)}: \text{IF } (\Delta x_1 \text{ це } A_1^{prf} \text{ AND } \Delta x_2 \text{ це } A_2^{prf} \text{ AND } \Delta x_3 \text{ це } A_3^{nrm}) \text{ THEN } (d \text{ це } B^{fine})$$



У результаті агрегації підумов правил  $R^{(1)}$  та  $R^{(2)}$  із використанням операції нечіткої кон'юкції отримаємо множину  $\bar{B}^m$ , функцію належності якої знаходимо за формулою (3.24):

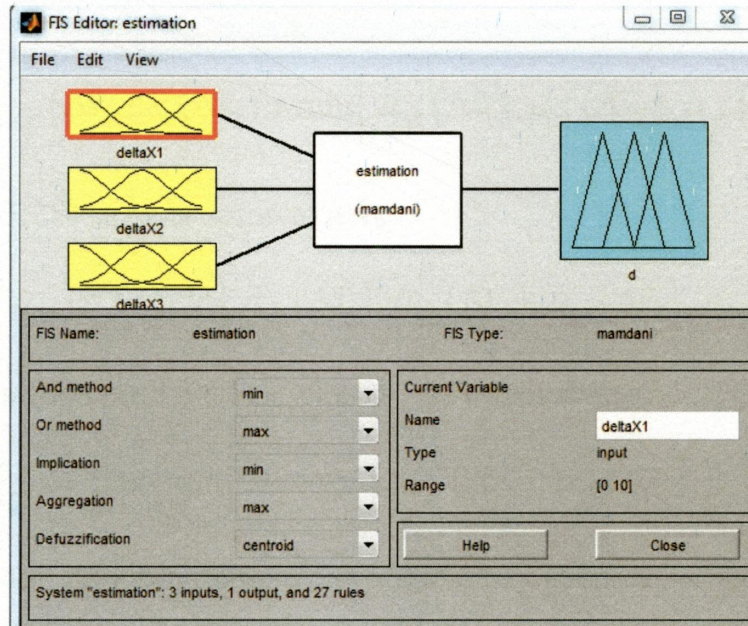


Рис. 3.11. Fuzzy модель Мамдані у програмному середовищі Matlab

$$\mu_{\bar{B}^m}(d) = \sup_{\Delta x_1, \Delta x_2, \Delta x_3} \left[ \min \left( \mu_{A_1' \times A_2' \times A_3'}(\Delta x_1, \Delta x_2, \Delta x_3), \mu_{R^{(N)}}(\Delta x_1, \Delta x_2, \Delta x_3, d) \right) \right], \quad (3.28)$$

де  $\mu_{R^{(N)}}(\Delta x_1, \Delta x_2, \Delta x_3, d)$  – функція належності нечіткого відношення  $R^{(N)}$ .

Припустимо, що

$$\begin{aligned} \mu_{A_1' \times A_2' \times A_3'}(\Delta x_1, \Delta x_2, \Delta x_3) &= \min \left[ \mu_{A_1'}(\Delta x_1), \mu_{A_2'}(\Delta x_2), \mu_{A_3'}(\Delta x_3) \right] = \\ &= \min \left[ \delta(\Delta x_1 - \Delta \bar{x}_1), \delta(\Delta x_2 - \Delta \bar{x}_2), \delta(\Delta x_3 - \Delta \bar{x}_3) \right]. \end{aligned} \quad (3.29)$$

Тоді

$$\begin{aligned} \mu_{\bar{B}^k}(d) &= \sup_{\Delta x_1, \Delta x_2, \Delta x_3} \left[ \min \left( \delta(\Delta x_1 - \Delta \bar{x}_1), \delta(\Delta x_2 - \Delta \bar{x}_2), \delta(\Delta x_3 - \Delta \bar{x}_3), \mu_{R^{(N)}}(\Delta x_1, \Delta x_2, \Delta x_3, d) \right) \right] = \\ &= \mu_{R^{(N)}}(\Delta \bar{x}_1, \Delta \bar{x}_2, \Delta \bar{x}_3, d). \end{aligned} \quad (3.30)$$

Оскільки

$$\mu_{R^{(N)}}(\Delta \bar{x}_1, \Delta \bar{x}_2, \Delta \bar{x}_3, d) = \mu_{A_1^k \times A_2^k \times A_3^k \rightarrow B^m}(\Delta \bar{x}_1, \Delta \bar{x}_2, \Delta \bar{x}_3, d), \quad (3.31)$$

то з використанням формули (3.24) на етапі імплікації отримаємо:

$$\mu_{A_1^k \times A_2^k \times A_3^k \rightarrow B^m}(\Delta\bar{x}_1, \Delta\bar{x}_2, \Delta\bar{x}_3, d) = \min \left[ \mu_{A_1^k \times A_2^k \times A_3^k}(\Delta\bar{x}_1, \Delta\bar{x}_2, \Delta\bar{x}_3), \mu_{B^m}(d) \right]. \quad (3.32)$$

Крім того,

$$\mu_{A_1^k \times A_2^k \times A_3^k}(\Delta\bar{x}_1, \Delta\bar{x}_2, \Delta\bar{x}_3) = \min \left[ \mu_{A_1^k}(\Delta\bar{x}_1), \mu_{A_2^k}(\Delta\bar{x}_2), \mu_{A_3^k}(\Delta\bar{x}_3) \right]. \quad (3.33)$$

Тому формулу (3.28) можна записати як

$$\mu_{B^m}(d) = \min \left[ \mu_{A_1^k}(\Delta\bar{x}_1), \mu_{A_2^k}(\Delta\bar{x}_2), \mu_{A_3^k}(\Delta\bar{x}_3), \mu_{B^m}(d) \right]. \quad (3.34)$$

На етапі акумуляції згідно з формулою (3.27) отримаємо:

$$\mu_{B^m}(d) = \max_{N=1,2} \left\{ \min \left[ \mu_{A_1^k}(\Delta\bar{x}_1), \mu_{A_2^k}(\Delta\bar{x}_2), \mu_{A_3^k}(\Delta\bar{x}_3), \mu_{B^m}(d) \right] \right\}. \quad (3.35)$$

Приклад візуалізації процедури нечіткого висновку зображено на рисунку 3.12.

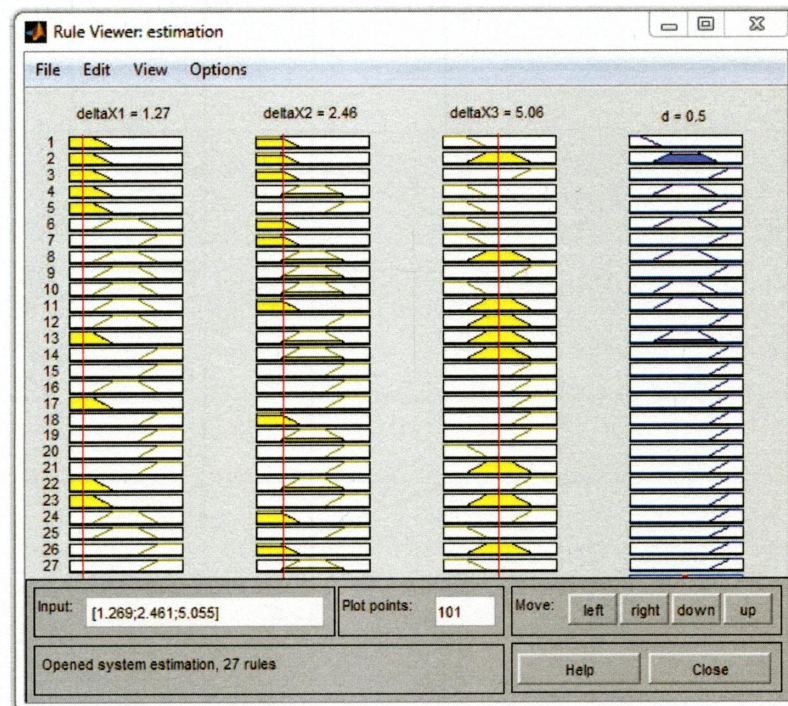


Рис. 3.12. Візуалізація нечіткого висновку

На рисунку 3.13 подана графічна інтерпретація нечіткого висновку за формулами (3.29)-(3.36).

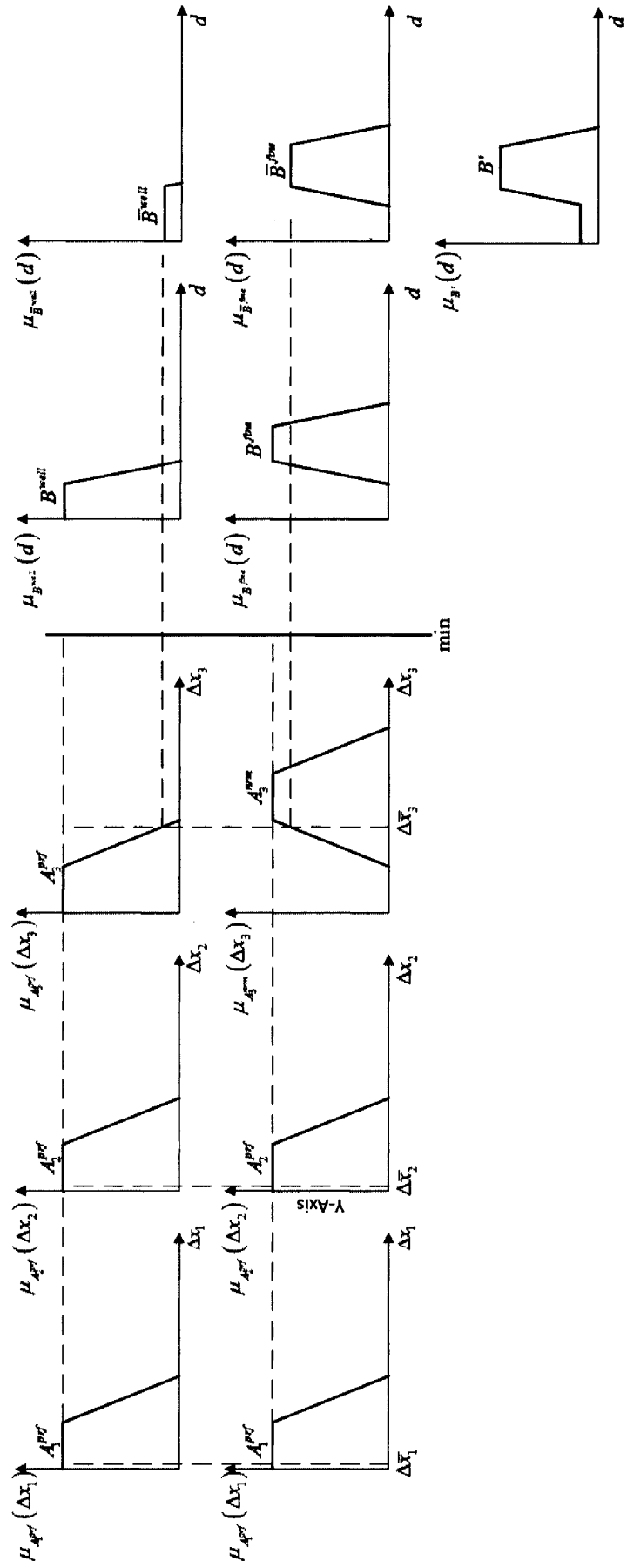


Рис. 3. 13. Графічна інтерпретація нечіткого висновку

- **дефазифікації** – перетворення лінгвістичних змінних виходу у вихідний сигнал.

Після логічної обробки нечітких даних (процедура інференціювання) отримуємо нечітку множину  $B'$  з функцією належності (3.27).

Для відображення нечіткої множини  $B'$  в єдине значення  $\bar{d} \in D$  використовуємо метод центра ваги (рис. 3.14), згідно з яким значення  $\bar{d}$  розраховують як центр ваги функції належності  $\mu_{B'}(d)$ :

$$\bar{d} = \frac{\int_D d \max_m \mu_{B'}(d)}{\int_D \max_m \mu_{B'}(d)}. \quad (3.36)$$

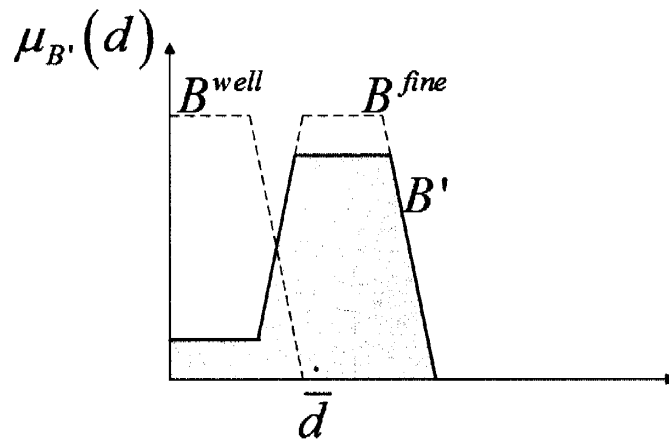


Рис. 3.14. Структура дефазифікації вихідної лінгвістичної змінної  $\bar{d}$  методом центра ваги

Дефазифікація вихідної лінгвістичної змінної  $\bar{d}$  методом центра ваги для значень функції належності  $\mu_{B'}(d)$  приводить до значення 0,5. Це значення є результатом розв'язування задачі нечіткого висновку і свідчить про те, що технічний стан проточної частини ВЦН 650-21-2 – допустимий.

На рисунку 3.15 показана тривимірна поверхня нечіткого висновку, що дозволяє установити залежність значень вихідної змінної  $\bar{d}$  від значень окремих вхідних змінних.

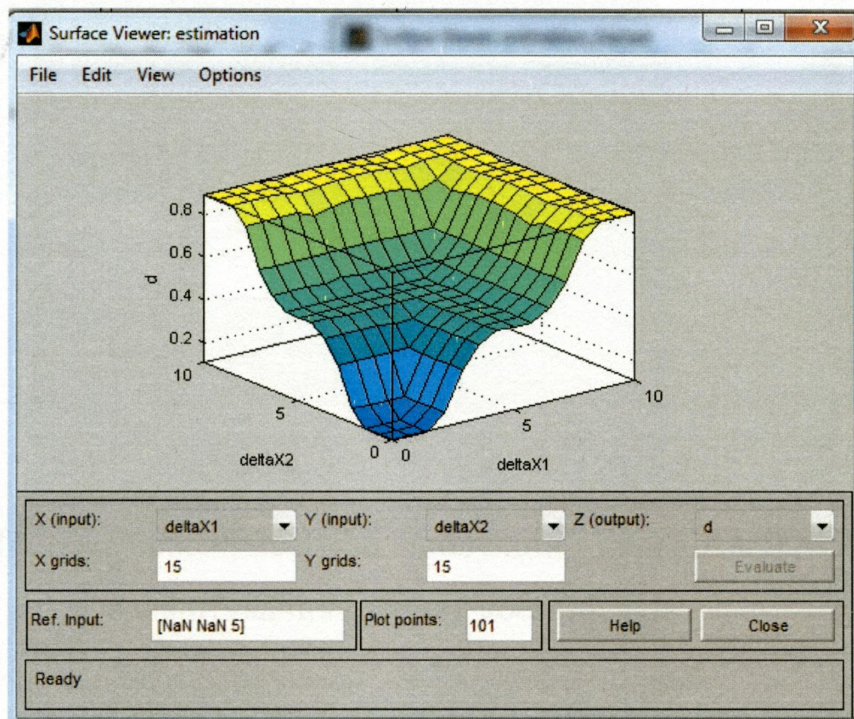


Рис. 3.15. Візуалізація поверхні нечіткого висновку

Вагові коефіцієнти отриманої нечіткої моделі рівні 1, а середня абсолютна нев'язка між експериментальними даними та результатами нечіткого логічного висновку рівна 2,376. Тому для покращення результату нечіткого висновку розв'яжемо оптимізаційну задачу (3.25) з використанням функції Optimization Toolbox – `fmincon` (додаток Ж). База правил нечітких продукцій у середовищі Matlab після налаштування вагових коефіцієнтів показана на рисунку 3.16, а поверхня, що відповідає нечіткій системі після оптимізації вагових коефіцієнтів, – на рисунку 3.17.

Оскільки середня абсолютна нев'язка між експериментальними даними та результатами нечіткого логічного висновку рівна 0,564, то доходимо висновку, що цю систему можна успішно застосовувати в практиці оцінювання технічного стану проточної частини двоступеневого ВЦН природного газу.

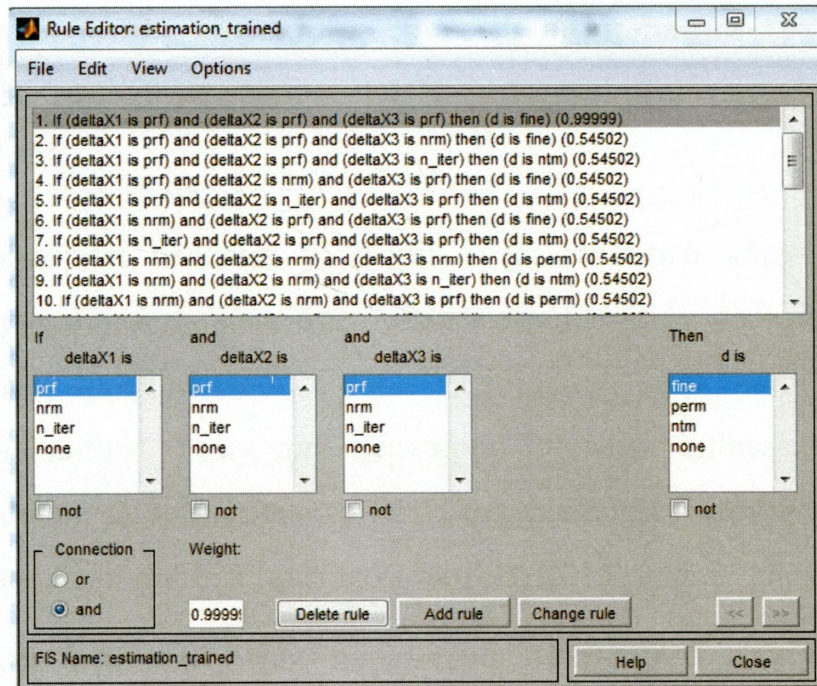


Рис. 3.16. База правил нечітких продукцій у середовищі Matlab після налаштування вагових коефіцієнтів

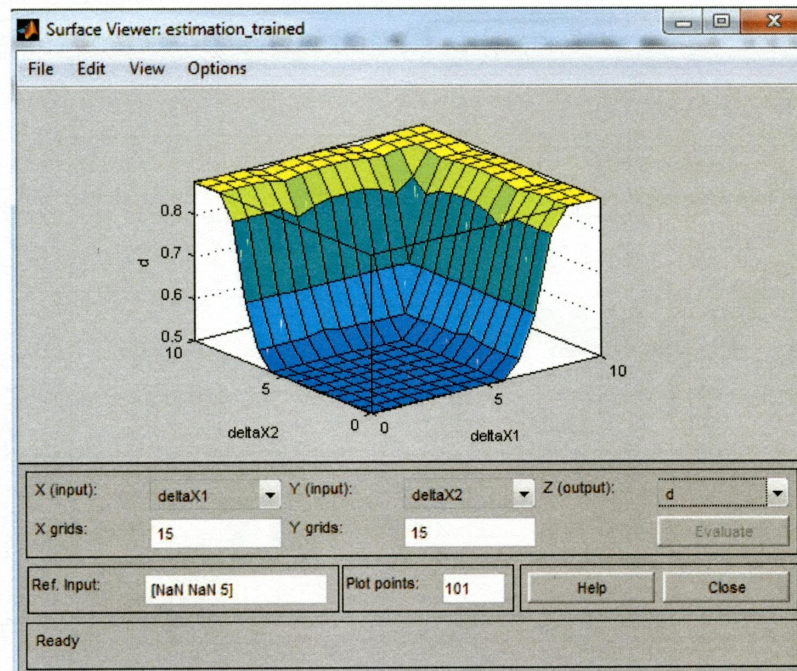


Рис. 3.17. Візуалізація поверхні нечіткого висновку після оптимізації вагових коефіцієнтів

### 3.5 Експериментальна перевірка системи оцінювання технічного стану проточної частини двоступеневого ВЦН природного газу під час його експлуатації

Одним із важливих завдань у теорії автоматичного керування є оцінка технічного стану агрегату в умовах його експлуатації, що, у свою чергу, зменшує собівартість ремонтно-профілактичних робіт та збільшує ефективність експлуатації компресорного обладнання. Тому для перевірки системи оцінювання технічного стану проточної частини двоступеневого ВЦН взято експлуатаційні характеристики ВЦН-650-21-2 під час його роботи протягом лютого 2016 року.

Для отримання значень зміни параметрів технічного стану  $\Delta x_i$  потрібно перерахувати значення об'ємної продуктивності  $Q_j^{(0)}$ , що відповідають умовам роботи ВЦН 650-21-2 після капітального ремонту, до умов його роботи протягом лютого 2016 року. Для цього, використовуючи формулу (2.39), побудуємо емпіричну модель двоступеневого ВЦН 650-21-2 (рис. 3.18).

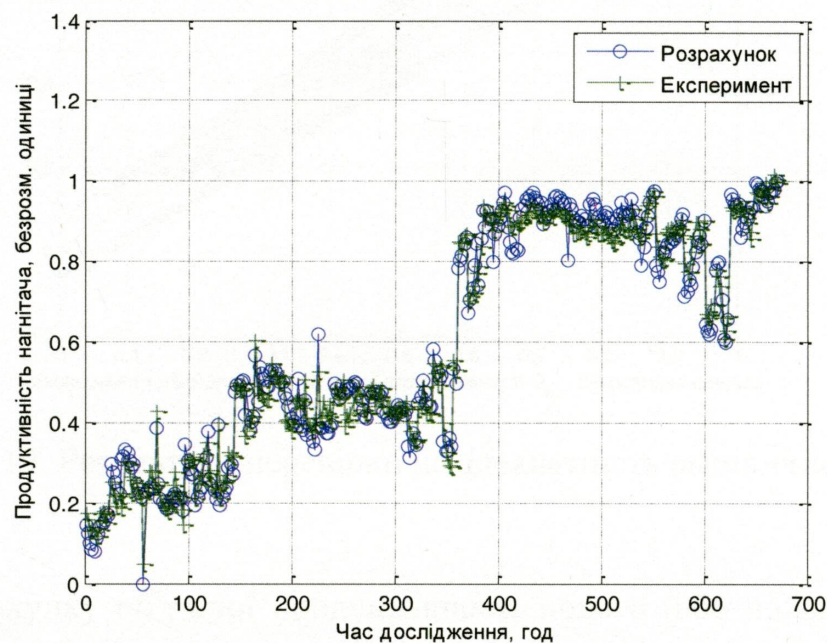


Рис. 3.18. Зміна об'ємної продуктивності ВЦН 650-21-2 за місяць лютий 2016 року в безрозмірних одиницях

Адекватність отриманої емпіричної моделі перевірено за допомогою коефіцієнта кореляції  $K_{Yy}$  та середньоквадратичного відхилення  $\sigma_{Yy}$ , визначених відповідно за формулами (3.2) та (3.3). Було отримано:  $K_{Yy} = 0,96$  та  $\sigma_{Yy} = 0,0356$  м<sup>3</sup>/с, що свідчить про достатній ступінь кореляції між експериментальними  $Y$  та розрахунковими значеннями  $y$ .

На рисунку 3.19 показані результати перевірки на адекватність емпіричної моделі (2.39). Пряма лінія регресії, побудована з використанням МНК-методу, свідчить про досить мале відхилення експериментальних значень  $Y$  від розрахункових значень  $y$ , що є підтвердженням достатньої адекватності отриманої емпіричної моделі (2.39).

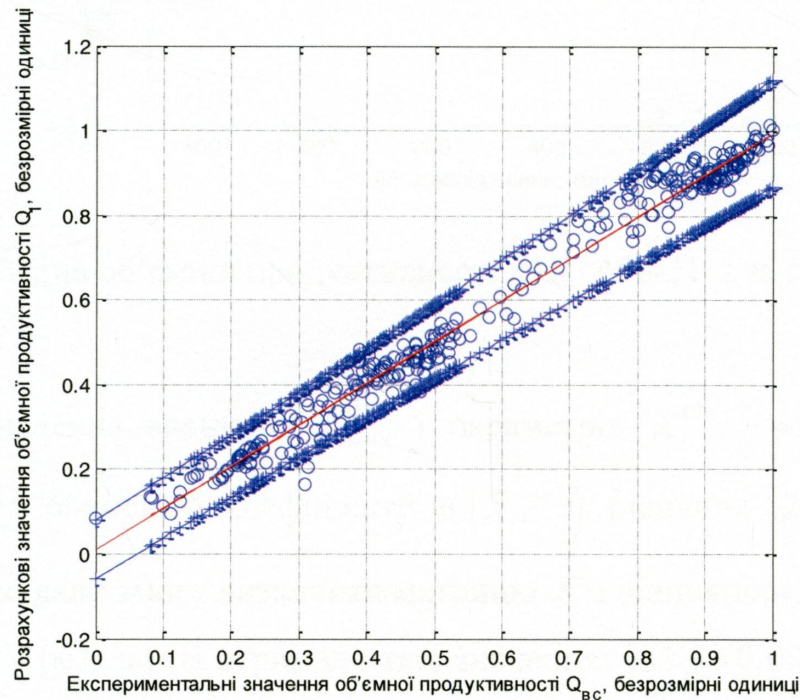


Рис. 3.19. Результати перевірки на адекватність емпіричної моделі

Після перерахунку об'ємної продуктивності нового (або після КР) нагнітача для поточних умов за формулою (2.46) знайдемо значення об'ємної продуктивності за поточний місяць у розмірних одиницях за формулою (2.47). Отримали графік



зміни об'ємної продуктивності ВЦН протягом лютого 2016 року, що показаний на рисунку 3.20.

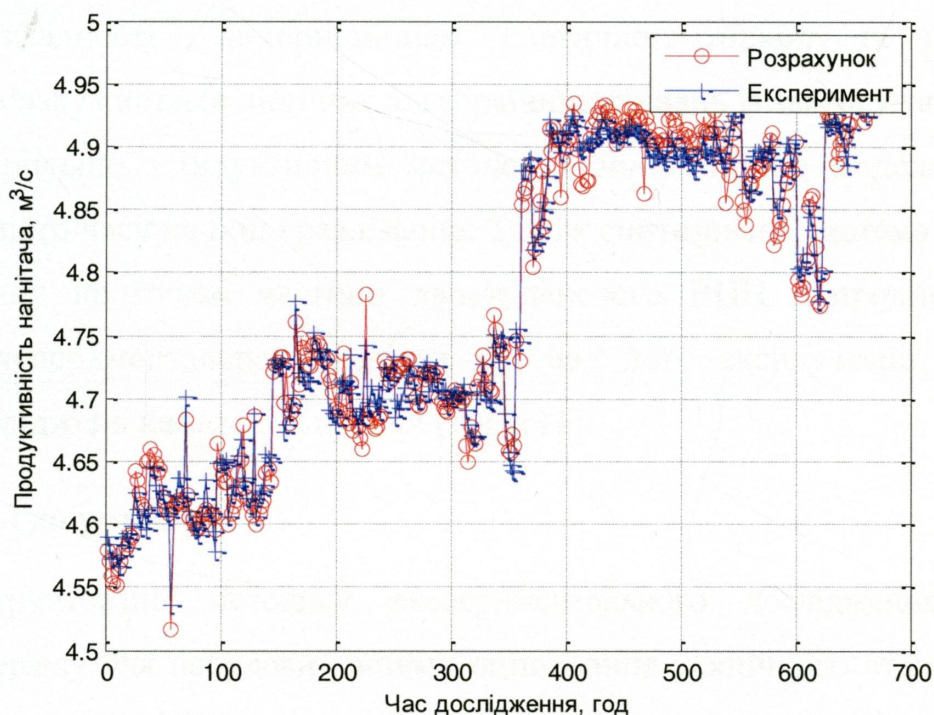


Рис. 3.20. Зміна об'ємної продуктивності ВЦН 650-21-2 за поточний місяць

Після визначення величин  $Q_{count,i}^{(o)}$  і параметрів  $X_i^{(0)}$ ,  $i = \overline{0,4}$  за формулами (2.33)-(2.35) були обчислені коефіцієнти  $\beta_i(\bar{X}, \bar{u}^{(j)})$  рівняння (2.49) у всіх точках спостережень, що дало змогу визначити матрицю  $F$  і відповідно варіації параметрів  $\Delta X_i$ ,  $i = 1, 2, 3$ . У результаті отримали такі значення:  $|\Delta X_1| = 0,0073$ ;  $|\Delta X_2| = 0,0026$ ;  $|\Delta X_3| = 0,0062$ . Відповідно отримали їхні відносні значення –  $\Delta x_1 = 0,04\%$ ,  $\Delta x_2 = 0,01\%$  і  $\Delta x_3 = 1,07\%$ , які є вхідними лінгвістичними змінними розробленого вище фази-проекту системи оцінювання технічного стану проточної частини двоступеневого ВЦН природного газу.

Дефазифікація вихідної лінгвістичної змінної  $\bar{d}$  методом центра ваги для значень функції належності  $\mu_{B'}(d)$  приводить до значення 0,11. Це значення є

результатом розв'язування задачі нечіткого висновку і свідчить про те, що технічний стан проточної частини ВЦН 650-21-2 – нормальний.

Отже, в цьому розділі удосконалено метод побудови емпіричної моделі оптимальної складності з використанням генетичного підходу та паралельного алгоритму розв'язку системи лінійних алгебраїчних рівнянь із застосуванням методу Гаусса, що порівняно з індуктивним методом самоорганізації моделей скорочує затрати машинного часу на їхню реалізацію. Також синтезована система оцінювання технічного стану проточної частини двоступеневого ВЦН природного газу та виконано її експериментальна перевірка під час його експлуатації. Результати зазначених досліджень наведені в працях [106-111].

### **Висновки до розділу**

1. Обґрунтовано методику експериментального дослідження з метою отримання матеріалу для побудови системи оцінювання технічного стану проточної частини двоступеневого ВЦН, що дало змогу включити в систему технологічні та геометричні параметри ВЦН, а також врахувати втрати на витоки газу і тертя дисків.

2. Отримано емпіричну модель ВЦН, засновану на принципі самоорганізації і мінімального обсягу апріорної інформації про об'єкт, що дало змогу визначити значення об'ємної продуктивності ВЦН за місяць до капітального ремонту. Вибір структури моделі ґрунтується на принципах генетичних алгоритмів. Ефективність та адекватність емпіричної моделі ВЦН підтверджено результатами експериментальних спостережень за роботою двоступеневого ВЦН 650-21-2 на КС-39 «Прогрес».

3. Для зменшення часу реалізації генетичного алгоритму синтезу емпіричної моделі оптимальної складності запропоновано паралельний алгоритм розв'язку системи лінійних алгебраїчних рівнянь із використанням методу Гаусса.

4. Синтезовано систему оцінювання технічного стану проточної частини двоступеневого ВЦН із використанням основних понять та визначень нечіткої логіки, що підвищує ефективність прийняття відповідних рішень для оцінювання технічного стану проточної частини двоступеневого ВЦН. 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 ВЦН 650-21-2 – 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 підтверджено експериментально на основі експлуатаційних характеристик ВЦН-650-21-2 протягом лютого 2016 року.

## РОЗДІЛ 4

### КОМП'ЮТЕРНА СИСТЕМА КОНТРОЛЮ ПАРАМЕТРІВ ДВОСТУПЕНЕВОГО ВЦН ПРИРОДНОГО ГАЗУ

#### 4.1 Структура системи контролю параметрів двоступеневого ВЦН природного газу

Система контролю параметрів двоступеневого ВЦН ґрунтується на вже існуючій системі керування роботою КС (рис. 4.1), що забезпечує оперативно-диспетчерське керування агрегатами в реальному часі. Розроблена система розгорнута у вигляді автоматизованого робочого місця (АРМ) на базі серійних персональних електронно-обчислювальних машин і входить до складу інтегрованої системи керування Богородчанським ЛВУМГ, що має чотирирівневу ієрархічну структуру [127].

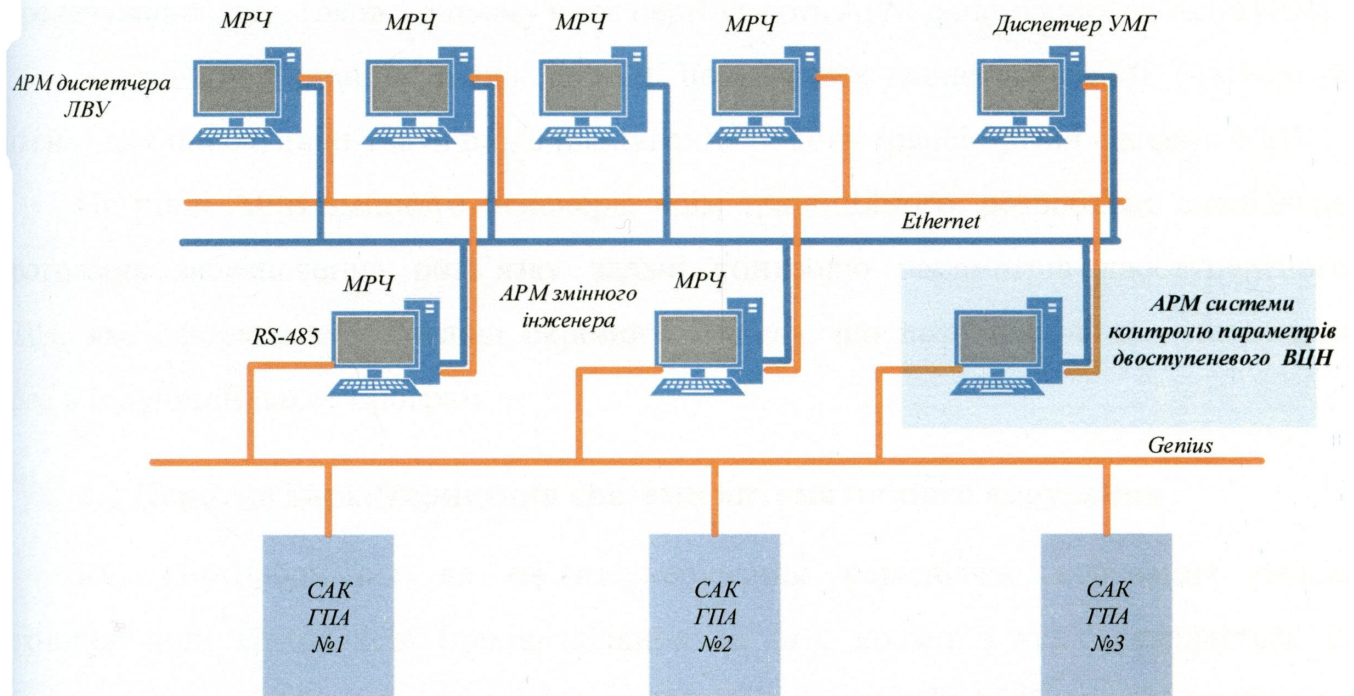


Рис. 4.1. Структура комп'ютерної системи контролю параметрів двоступеневого ВЦН в умовах Богородчанського ЛВУМГ

Найнижчий рівень системи керування містить контролери та виконавчі механізми, що виконують функції локального керування компресорними агрегатами (САК ГПА).

На другому рівні керування перебувають функціонально-орієнтовані АРМ для реалізації оперативного керування агрегатами КС. АРМ змінного інженера призначене для обробки, відображення й збереження в базі даних (БД) реального часу інформації про хід ТП; розрахунку режимів роботи та формування звітних документів.

Третій рівень керування – це рівень оперативного планування диспетчера лінійного виробничого управління, на якому розв’язуються задачі оптимізації та розрахунку техніко-економічних показників роботи КС на рівні ЛВУМГ. На основі проведених розрахунків з урахуванням завдання від диспетчера управління магістральними газопроводами (УМГ), диспетчер ЛВУМГ формує завдання для перекачування газу. Також на цьому рівні перебувають АРМ допоміжних об’єктів [104].

Частина інформації з рівня ЛВУМГ передається диспетчеру УМГ (четвертий рівень) для оперативно-тактичного планування роботи транспортної системи УМГ.

На рівні АРМ змінного інженера, крім традиційного, розроблене спеціальне програмне забезпечення розв’язку задачі контролю параметрів двоступеневого ВЦН, яке оформлене у вигляді окремого модуля, що дозволяє легко інтегрувати його в існуючий пакет програм.

#### **4.2 Коротка характеристика системи автоматичного керування**

КС «Богородчани» як об’єкт керування передбачає керування рядом технологічних комплексів (цехів, ділянок та ін.), кожен з яких складається із технологічних установок (агрегатів) на базі інтегрованої АСК, яка об’єднує усі дирекції управління і оброблення інформації та охоплює усі етапи від планування до регулювання параметрів технологічних процесів.

АСК ТП компримування газу включає сукупність технічних засобів і методів збирання, оброблення, аналізування, видачі інформації і здійснення керувального впливу

на хід ТП, який із взаємодією із диспетчером КС забезпечує заплановане проходження ТП (рис. 4.2).

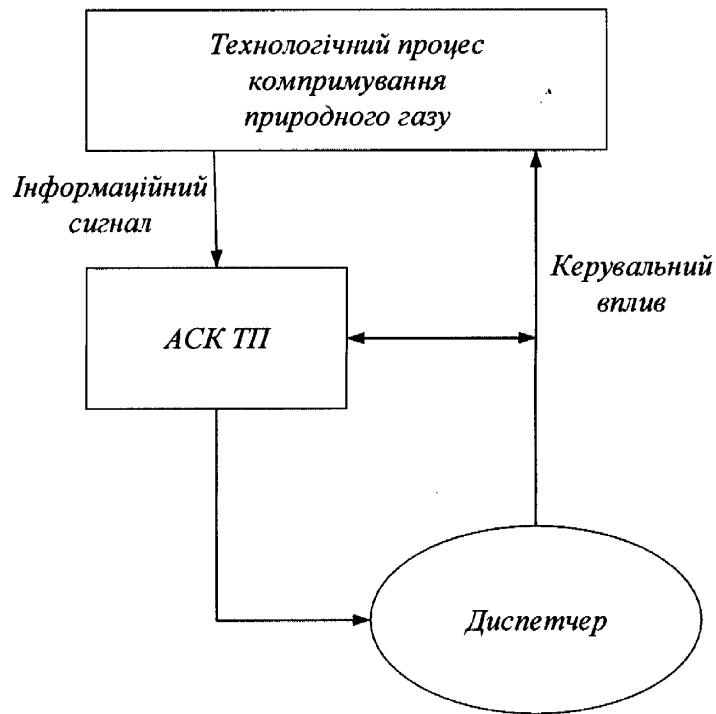


Рис. 4.2. Загальна структура АСК ТП компримування газу

Серед основних компонентів АСК ТП можна виділити додаток SCADA (Supervisory Control and Data Acquisition – диспетчерське управління і збір даних). Використання SCADA-технологій дозволяє досягати високого рівня автоматизації для вирішення завдань розроблення систем ідентифікації, управління, контролю, збирання, оброблення, передавання, відображення та зберігання інформації. На даний час відома велика кількість пакетів інструментального програмного забезпечення (ПЗ) рівня SCADA, найпопулярніші з яких наведені в таблиці 4.1 [128].

Для розв’язання основних задач автоматизації ТП і для проектування верхнього рівня систем на КС «Богородчани» використовують SCADA-систему Citect фірми Citect. ПЗ Citect включає всі необхідні функціональні блоки (тренди, звіти, драйвери, протоколи) і дозволяє реалізувати віддалений моніторинг системи управління ТП [129].

Таблиця 4.1

## Популярні SCADA-пакети [128]

SCADA	Фірма-розробник	Країна
InTouch	Wonderware	США
iFIX	Intellution	США
Genesis	Iconics	США
RSView	Rockwell Software Inc	США
Citect SCADA	Citect	Австралія
Vijeo Citect	Schneider Electric	Франція
RealFlex	BJ Software Systems	США
Factory Link	United States DATA Co	США
Sitex	Jade Software	Велика Британія
WinCC	Siemens	Німеччина
TraceMode	AdAstra	Росія
IGSS	Seven Technologies	Данія
Cimplicity	GE Fanuc	США-Японія
Visual Intellect	Мікрол	Україна

Програмні продукти компанії Citect являють собою інтегрований набір засобів розроблення додатків, використовуваний для створення систем промислового контролю і накопичення даних; для комп'ютеризованих засобів регулювання параметрів обладнання і технологічних процесів; для ведення реляційних баз даних реального часу; для перегляду інформації з мереж Internet та Intranet, а також підтримки до декількох сотень драйверів, що з'єднують прикладні системи з технологічними давачами.

Частина технічних засобів АСК, що виконує операції збирання, оброблення та контролю інформації, може бути розглянута як окрема САК. Для управління, захисту та контролю за роботою агрегатів на КС-39 «Прогрес» застосовано САК

типу «САТ-04» НВП «Нова техніка» (м. Львів). Дана САК ГПА також використовується на КС «Долина», «Бердичів», «Кіровоградська», «Волинська» та «Ужгород» [129].

САК ЕГПА-25РЧ умовно можна поділити на [130] (рис. 4.3):

- апаратуру нижнього рівня, що безпосередньо управляє агрегатом через технологічний контролер;
- АРМ диспетчера КС, з якого можливо впливати на роботу нижнього рівня, а також забезпечувати оброблення технологічної інформації, її оперативне представлення, формування архівів аварійних зупинок, архівів вимірювальних параметрів і станів технологічних параметрів виконавчих механізмів.

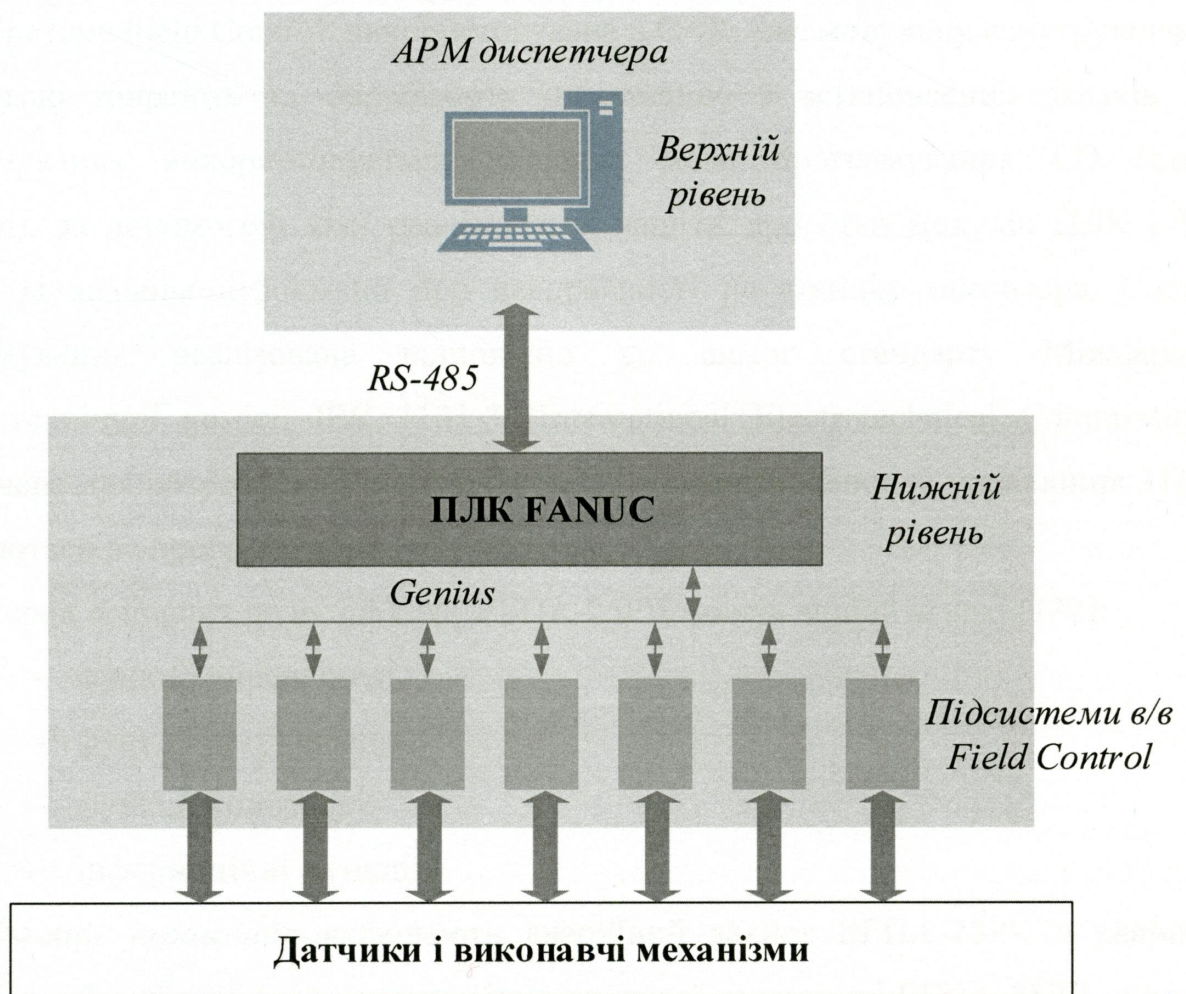


Рис. 4.3. Структурна схема САК ЕГПА-25РЧ



Нижній рівень САК ЕГПА-25РЧ побудований на основі програмованого логічного контролера (ПЛК) FANUC 90-70 і 90-30 фірми «General Electric» (США), що пов'язані між собою через мережу «Genius» в межах КС [77]. Вони використовуються для збирання і попереднього оброблення інформації, отриманої від давачів та видачі керувальних сигналів на виконавчі механізми ГПА.

Апаратуру серії 90-70 розміщують у 19 дюймових крейтах (корзинах). У крейти вставляються модулі, які, залежно від призначення, поділять на різні типи: процесорні, інтерфейсні, введення або виведення аналогових сигналів; введення або виведення дискретних сигналів, блоки живлення. В одному з крейтів розміщують процесорний блок, в інших – модулі введення-виведення [131].

Система Field Control, використовувана в САК, має модульну конструкцію. З її допомогою збирають та обробляють інформацію з встановлених давачів. Для програмування використовується графічна мова програмування LD (Ladder Diagram), за допомогою якої реалізуються запити про стан модулів ПЛК і Field Control із надання інформації про несправності на станцію оператора. Система програмування реалізована відповідно до вимог стандарту Міжнародної електротехнічної комісії ІЕС 1131-3 (International Electrotechnical Commission) і призначена для розроблення прикладного ПЗ збирання даних та управління ТП, які виконуються на програмованих контролерах.

Серед основних функцій САК ЕГПА-25РЧ можна виділити такі [132]:

- функції управління;
- функції регулювання;
- функції контролю;
- інформаційні функції.

*Функції управління* включають аварійний захист ЕГПА-25РЧ в аварійних ситуаціях, обмеження режиму, перевірку пускової готовності ЕГПА-25РЧ, холодну прокрутку ЕГПА-25РЧ, автоматичний пуск ЕГПА-25РЧ з незавантаженим і завантаженим контуром нагнітача, автоматичне і дистанційне керування ВМ та кранами газової обв'язки агрегату за заданими алгоритмами, заборону виконання

команд оператора під час роботи ЕГПА-25РЧ в автоматичному режимі управління, якщо вони не передбачені алгоритмом управління, автоматичне завантаження ЕГПА-25РЧ в трасу, автоматичну нормальну зупинку ЕГПА-25РЧ, автоматичну аварійну зупинку, екстрений аварійний захист ЕГПА-25РЧ у разі відмови САК або команді оператора та протипомпажний захист.

*Функції регулювання* визначаються антипомпажним регулюванням, тобто включають управління антипомпажним клапаном.

*Функції контролю* реалізуються через контроль технологічних параметрів ЕГПА-25РЧ (ТП і технічного стану обладнання), контроль відхилення параметрів ТП і технічного стану обладнання компресорного цеху від встановлених параметрів в алгоритмі управління, контроль виконання команд управління, які формуються САК (прямий або непрямий), контроль (постійний або періодичний) справності ланцюгів дискретних давачів аварійних захистів, ланцюгів управління соленоїдами кранів і магнітних пускачів виконавчих механізмів (ВМ) ЕГПА-25РЧ, автоматичний контроль працездатності основних модулів і блоків комплексу із визначенням місця відмови.

*Інформаційні функції* включають надання інформації про невиконання передпускових умов, надання інформації про поточні значення контрольованих технологічних параметрів ЕГПА-25РЧ у читабельній для диспетчера формі, відображення і звукове попередження про несправності та передаварійні ситуації.

Верхній рівень САК має забезпечити отримання інформації від усіх давачів системи, її аналізування, зберігання і представлення диспетчеру [133]. Ці дії не можуть бути виконані одночасно, тому зі створенням системи контролю параметрів двоступеневого ВЦН потрібно визначити черговість отримання інформації від давачів, способів аналізу інформації і порядок представлення її оператору, тобто розробити алгоритм системи контролю параметрів двоступеневого ВЦН (рис. 4.4).

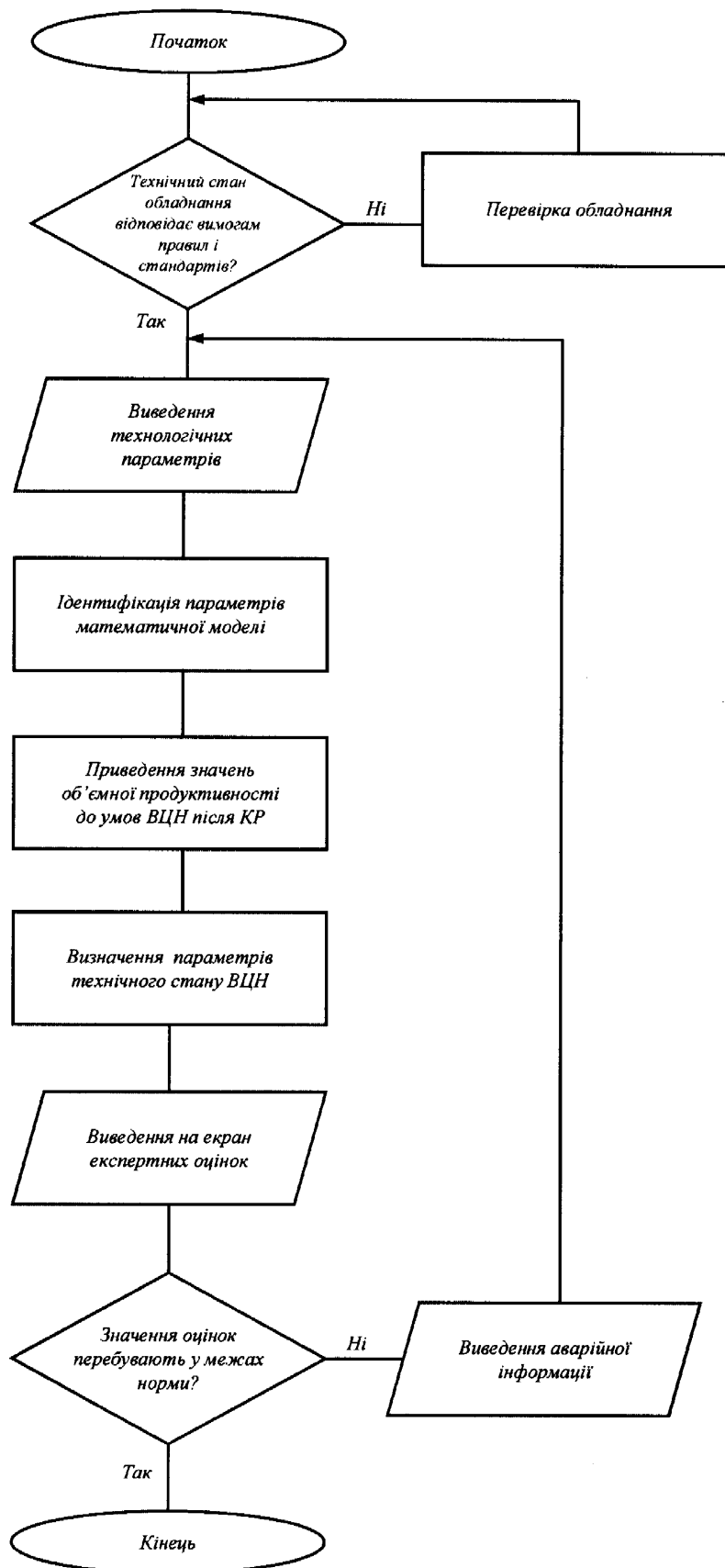


Рис. 4.4. Алгоритм системи контролю параметрів двоступеневого ВЦН природного газу

### **4.3 Спеціальне програмне забезпечення системи контролю параметрів двоступеневого ВЦН природного газу**

Надійне експлуатування ГТС України зводиться до ефективного і вчасного оцінювання технічного стану основного обладнання КС, в тому числі ГПА та його складових елементів. На сьогодні технічний стану ГПА оцінюють шляхом проведення планово-попереджувальних ремонтів, що має ряд недоліків. По-перше, ГПА може бути виведений у ремонт у справному стані після настання терміну чергового ремонту. По-друге, дефекти вузлів ГПА під дією зовнішніх та суб'єктивних чинників (порушення правил експлуатації, недосконалість конструкції) можуть розвиватися стрімко в міжремонтний період, що призводить до втрати його працездатності і надалі до ремонтно-відновлювальних робіт [132].

Тому, на сьогодні, актуальним є контроль параметрів обладнання КС у процесі їхньої експлуатації для оцінювання їхнього технічного стану. На рисунку 4.5 зображена взаємодія блоків програм контролю параметрів двоступеневого ВЦН природного газу. Всі програми написані алгоритмічною мовою MatLab.

ПЗ АРМ змінного інженера (ЗІ) запрограмоване за допомогою системи проектування Simplicity Control фірми «GE Fanuc» та поділене на: ПЗ «Сервер» (розміщується на жорсткому диску сервера), ПЗ «Клієнт» та ПЗ «ППП» (періодичної перевірки працездатності апаратури) [127].

ПЗ «ППП» забезпечує перевірку входних і вихідних дискретних каналів, калібрування аналогових каналів.

ПЗ «Клієнт» забезпечує людино-машинний інтерфейс з оператором (формування мнемосхем, графіків, повідомлень, звукових попереджень, формування команд управління, переглядання та друкування добової відомості і звіту перевірки захистів).

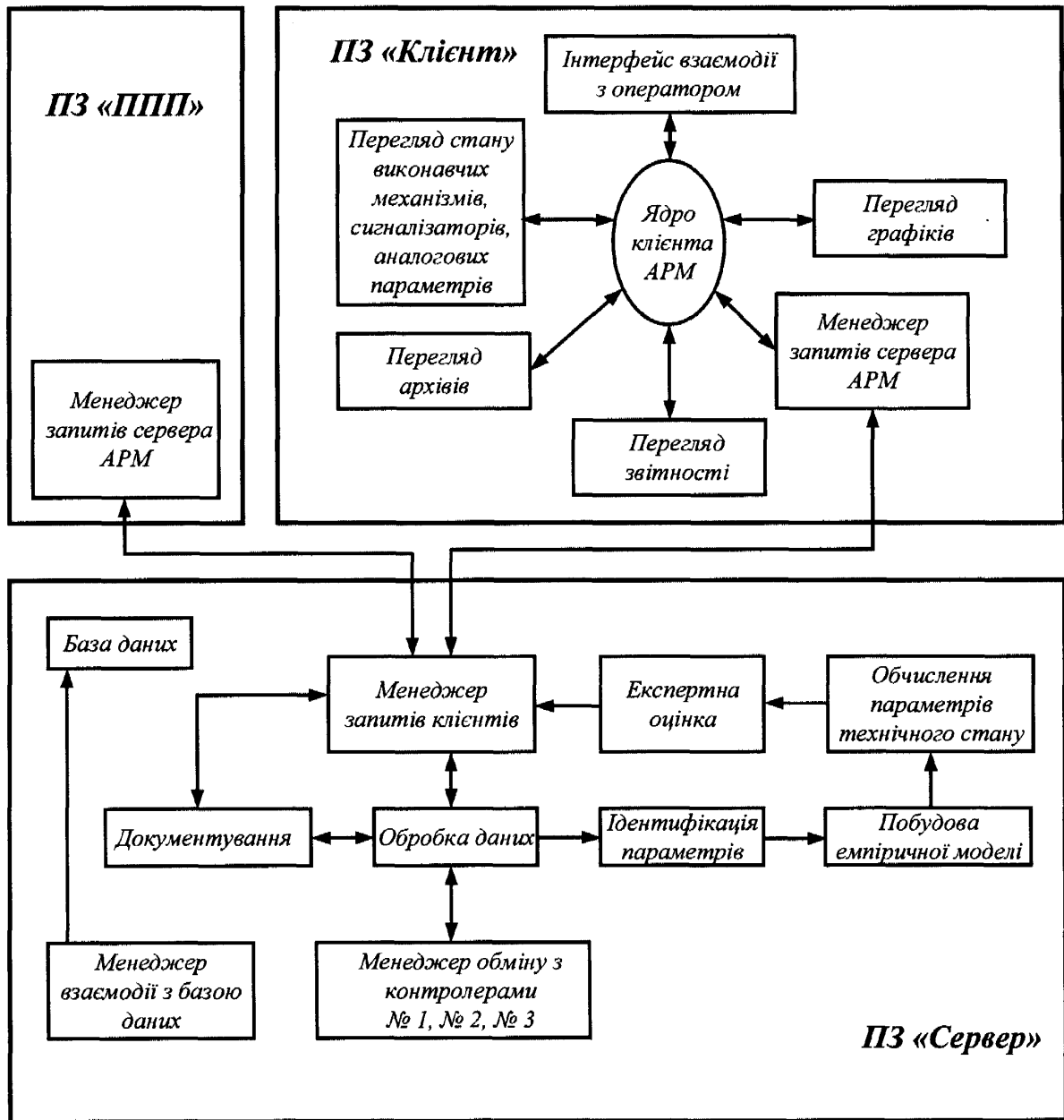


Рис. 4.5. Взаємодія блоків програм контролю параметрів двоступеневого ВЦН природного газу

ПЗ «Сервер» забезпечує взаємодію з ПЗ технологічних контролерів та контролера компресорного цеху; ПЗ «Клієнт», базою даних, системою фірми Serck Controls, а також архівує аналогові дані.

Уже існуючим програмним забезпеченням формується БД, що містить дані про технологічні параметри нагнітача, які відповідають умовам його роботи після

КР та за поточний місяць – температуру газу на вході і виході ВЦН, тиск газу на вході і виході ВЦН, перепад тиску газу на конфузори ВЦН, продуктивність нагнітача, швидкість обертання ротора ВЦН, а також дані про густину і хімічний склад природного газу та тиск і температуру навколишнього середовища.

Ці дані є вихідною інформацією для блоку програм «Ідентифікація параметрів математичної моделі ВЦН» (додаток Г), написаних алгоритмічною мовою MatLab, де відбувається обчислення величин  $\mu$ ,  $k_T$  та параметрів технічного стану ВЦН  $X_i^{(0)}$ , що відповідають умовам роботи ВЦН після КР. Він складається зі script-файлу KS3\_ga\_August та таких m-файлів:

- fun\_ZM\_August – програма обчислення коефіцієнтів стисливості газу на вході  $z_1$  та виході  $z_2$  ВЦН з використанням модифікованого рівняння стану «Бенедикта-Вебба-Рабіна».

- run\_KS3\_min\_August – програма обчислення задачі МНК (2.36) із використанням генетичного алгоритму, що реалізується за допомогою файл-функції ga. Програма ga має такий формат:

```
[x, fval]=ga(@nestedfun, 2, [], [], [], [], LB, UB, [], options),
```

де nestedfun – обчислює значення цільової функції (2.35);

LB, UB – нижні та верхні межі рішень генетичного алгоритму: LB=[0.3 0.6];  
UB=[1.8 1.18];

Options – налаштування генетичного алгоритму, що здійснюється за допомогою функції gaoptimset.

Блок програм «Побудова емпіричної моделі ВЦН» (додаток Е) синтезує емпіричну модель ВЦН у вигляді полінома (2.39) степеня  $m \leq 3$ . Моделювання емпіричної моделі реалізують за допомогою індуктивного методу самоорганізації моделей, а її структуру вибирають на основі використання генетичного алгоритму (script-файл fun\_Harasymiv\_March, який включає M-файли, що подані в табл. 4.2). Для зменшення часу реалізації генетичного алгоритму синтезу емпіричної моделі оптимальної складності запропоновано паралельний алгоритм розв'язку системи

лінійних алгебраїчних рівнянь із використанням методу Гаусса, програмна реалізація якого наведена також у додатку Е.

Таблиця 4.2

**Перелік М-файлів, через який реалізується індуктивний метод самоорганізації моделей**

Назва m-файлу	Функціональне призначення m-файлу
fun_Harasymiv_March	Синтезує емпіричну модель оптимальної складності, $m \leq 3$ із використанням генетичного алгоритму [97, с.143]
Fod	Реалізує побудову системи умовних рівнянь для повного полінома заданого степеня від заданої кількості змінних [97, с.143]
Population	Вибирає початкову популяцію хромосом [97, с.143]
ch_new	Реалізує операцію схрещування хромосом [97, с.143]
fun_parametr	Визначає параметри моделі за «найкращим» значенням хромосоми та вихід моделі [97, с.143]
Regi	Формує структури часткових моделей
fun_perform_Gauss	Знаходить розв'язок рівняння $\tilde{M}_{F,A} \bar{a}_A = \tilde{F}_A^T \bar{Y}_A$ із використанням розпаралеленого методу Гаусса

За результатами розрахунків за формулами (2.33)-(2.35) блоку програм «Обчислення зміни параметрів технічного стану» (додаток Є) здійснюють експертну оцінку технічного стану проточної частини нагнітача, яку реалізують із використанням блоку програм «Експертна оцінка» (додаток Ж). У випадку, коли стан проточної частини нагнітача оцінюється як «необхідно вжити заходів», програма керування агрегатом у технологічному контролері автоматично здійснює перехід агрегату до режиму «Екстрена зупинка».

Програмне забезпечення задачі контролю параметрів двоступеневого ВЦН оформлене у вигляді прикладного програмного модуля, в який інтегрована низка програмних продуктів, розроблених у середовищах MatLab та Delphi, що забезпечить відображення інформації на екрані монітора АРМ. Із використанням функціональних клавіш, розміщених на робочому вікні, оператор може переглянути параметри технічного стану двоступеневого ВЦН, побудувати графіки зміни значень об'ємної продуктивності після КР ВЦН, зміни об'ємної продуктивності ВЦН до КР, графічні результати ідентифікації параметрів математичної моделі та емпіричну модель двоступеневого ВЦН.

Всі програмні продукти, об'єднані інтегратором, що написаний об'єктно-орієнтованою мовою Delphi та оформлений у вигляді об'єктного вікна в Citect. Розроблене ПЗ забезпечує реалізацію таких функцій:

- збирання та оброблення даних про технологічні параметри;
- ідентифікація параметрів математичної моделі ВЦН;
- визначення значень об'ємної продуктивності ВЦН до та після КР;
- розрахунок параметрів технічного стану двоступеневого ВЦН;
- експертна оцінка технічного стану проточної частини двоступеневого ВЦН.

Взаємодія базового програмного комплексу та спеціального модуля пояснюється структурною схемою, наведеною на рисунку 4.7.

Інформаційно-вимірювальна система включає в себе давачі і виконавчі механізми для збирання інформації про значення технологічних параметрів, на основі яких контролери (САК ГПА) створюють масиви даних, які, за допомогою пристрою реєстрування інформації, реєструються в архіви для збереження значень технологічних параметрів для кожного із ВЦН.

Для розв'язку задачі контролю параметрів двоступеневого ВЦН вхідними параметрами блоку ідентифікації параметрів математичної моделі є такі значення технологічних параметрів ВЦН:



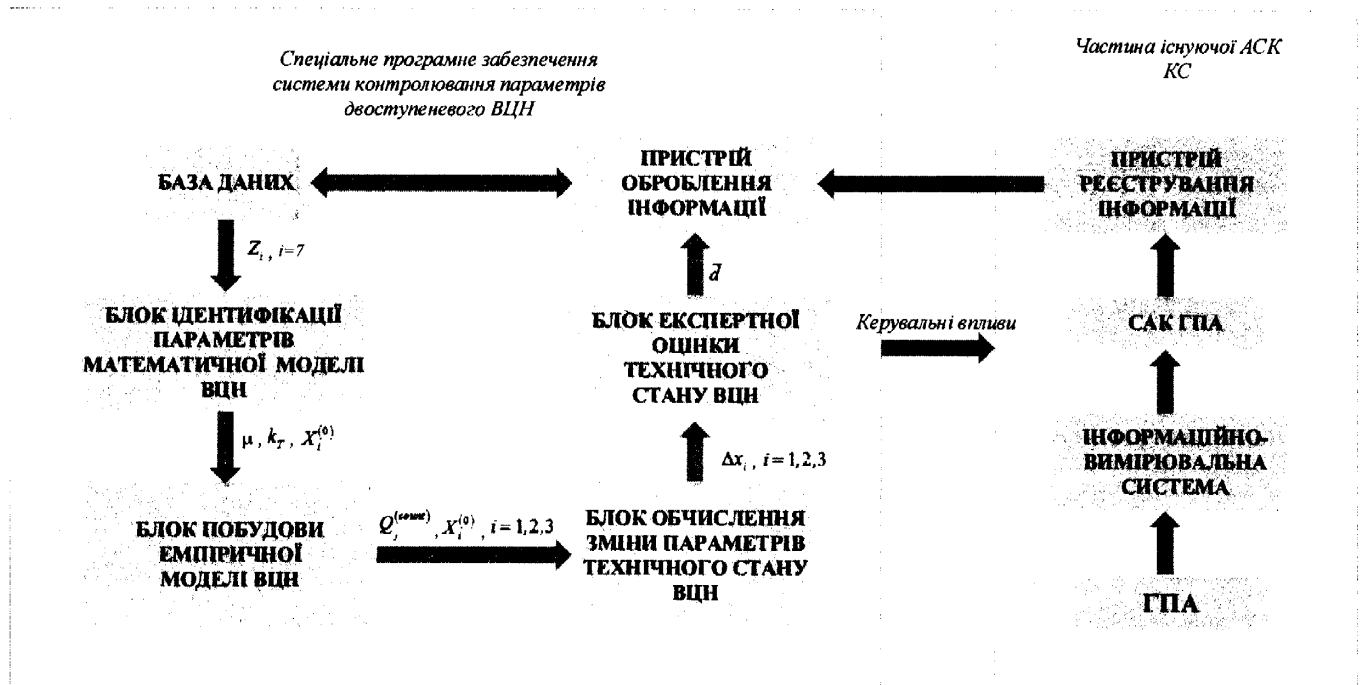


Рис. 4.7. Структурна схема системи контролю параметрів двоступеневого ВЦН природного газу

- частоти обертання робочого колеса;
- тиску газу на вході в нагнітач;
- тиску газу на виході нагнітача;
- перепаду тиску на конфузори компресора нагнітача;
- температури газу на вході в нагнітач;
- температури газу на виході нагнітача.

Пристрій оброблення інформації здійснює перерахунок і приведення значень технологічних параметрів в одні часові рамки та формує БД. Блок ідентифікації параметрів математичної моделі визначає параметри  $X_i^{(0)}$ ,  $i = \overline{0,4}$  та величини  $\mu$  і  $k_T$ , які є входніми величинами блоку побудови емпіричної моделі ВЦН, де виконується побудова емпіричної моделі ВЦН для обчислення значень об'ємної продуктивності  $Q_j^{(count)}$ , що перерахована до умов  $Q_j^{(0)}$ . Використовуючи значення величин  $X_i^{(0)}$ ,  $Q_j^{(count)}$  блок обчислення зміни параметрів технічного стану ВЦН

визначає відносну зміну параметрів  $\Delta x_i$ ,  $i = \overline{0,3}$ , за якими блок експертної оцінки оцінює технічний стан проточної частини двоступеневого ВЦН (вихідна змінна  $d$ ).

БД, яка використовується для збереження інформації – це сукупність таблиць, які умовно можна поділити на службові та параметричні. Службові таблиці включають в себе інформацію про структуру самої БД, перелік вимірювальних параметрів та інше. Всі параметричні таблиці однакові за своєю структурою і містять в собі номер вимірювання, дату, час вимірювання та значення вимірюваного параметра [130].

Для роботи з Matlab як із сервером Автоматизації необхідно знати властивості та методи (інтерфейси), які надає сервер Автоматизації. Обмін даними між Delphi-додатком і Matlab з боку Delphi-додатки (диспетчера Автоматизації) здійснюється за допомогою змінних варіантного типу (тип OLEVariant). Matlab, як сервер Автоматизації, надає Delphi-додаткам свої функції PutFullMatrix і GetFullMatrix для обміну кількістєвими масивами, а також функцію Execute для передавання команди на виконання операції сервером Автоматизації. Функції CreateOleObject та Quit відповідно відкривають і закривають сервер (Matlab) [133].

Наведемо фрагмент програмного коду, використовуваного для запуску математичного блоку, що відповідає за ідентифікацію параметрів математичної моделі, які відповідають умовам роботи ВЦН після його КР – KS3\_ga\_August:

```
V:=CreateOleObject('Matlab.Application');
V.Execute(KS3_ga_August '');
```

У цьому фрагменті диспетчер Автоматизації (Delphi- додаток) ініціює сервер Автоматизації (MatLab) і запускає на виконання сценарій KS3\_ga\_August.

Після виконання зазначених дій запускається математичний блок ідентифікації параметрів математичних моделей нагнітачів, який входить до розробленого модуля програми і є окремою самостійною процедурою, що створена засобами математичного пакету MatLab.

Так як алгоритми, що розраховують параметри процесу компримування природного газу, створені у вигляді окремих файлів системи MatLab, що мають

запускатися в певній визначеній послідовності, то для їхньої консолідації в єдине ціле використовують наявні засоби цього математичного пакету.

На початковому етапі роботи сценарій зчитує із файлу `input.bin`, набори значень параметрів та поміщає їх у власні внутрішні структури даних – масиви.

```
x0:=VarArrayCreate([1,1],varDouble);
x0i:=VarArrayCreate([1,1],varDouble);
V.GetFullMatrix('X0','base',VarArrayRef(x0),VarArrayRef(x0i));
x1:=VarArrayCreate([1,1],varDouble);
x1i:=VarArrayCreate([1,1],varDouble);
V.GetFullMatrix('X1','base',VarArrayRef(x1),VarArrayRef(x1i));
```

У наведеному фрагменті коду відбувається передача значення змінних Matlab X0 та X1 у варіантні змінні (x0, x0i) й (x1, x1i) програми Delphi.

Створення графічного інтерфейсу для відображення результатів обчислень та забезпечення можливості діалогової взаємодії з користувачем здійснюється за допомогою типових елементів управління, що підтримуються будь-якою високорівневою мовою програмування.

Результати роботи математичного модуля відображаються не лише у вигляді текстової інформації (за допомогою списків), але й у вигляді графіків.

Програми модуля контролю параметрів двоступеневого ВЦН спрацьовують за вимогою диспетчера. Після запуску на екрані відображається форма, зображена на рисунку 4.8. Це основна форма, що має робочу назву "Main".

Дане вікно (рис. 4.8) дозволяє контролювати параметри нагнітача під час його експлуатації, обчислити їхні зміни від значень, що відповідають умовам роботи нового нагнітача або після його КР, ідентифікувати параметри математичної моделі, побудувати емпіричну модель ВЦН та визначити поточний стан проточної частини нагнітача.

Після натиснення на кнопку "Провести розрахунок" відбувається послідовний запуск 3 сценаріїв `KS3_ga_August` (ідентифікації параметрів математичної моделі ВЦН), `EmpiricModel_KS3_March` (побудови емпіричної моделі ВЦН), `Estimation_KS39` (експертної оцінки технічного стану проточної частини ВЦН).



Рис. 4.8. Основне вікно програми-інтегратора

У результаті їхнього виконання заповнюються текстові поля форм, що відповідають відповідним параметрам, та будуються характерні графіки залежностей значень продуктивності нагнітача після КР від технологічних параметрів, графічні результати ідентифікації параметрів математичної моделі ВЦН із використанням ГА, емпірична модель ВЦН.

У вікні відобразатиметься результат нечіткого висновку, що дозволяє установити значення вихідної змінної  $d$  та графік зміни об'ємної продуктивності ВЦН за поточний місяць. У даному випадку  $d = 0,5$ , що свідчить про те, що технічний стан проточної частини нагнітача – допустимий. Після натиснення на кнопку "Деталі" ідентифікації параметрів математичної моделі відбувається перехід на нову форму з відповідною назвою (рис. 4.9).

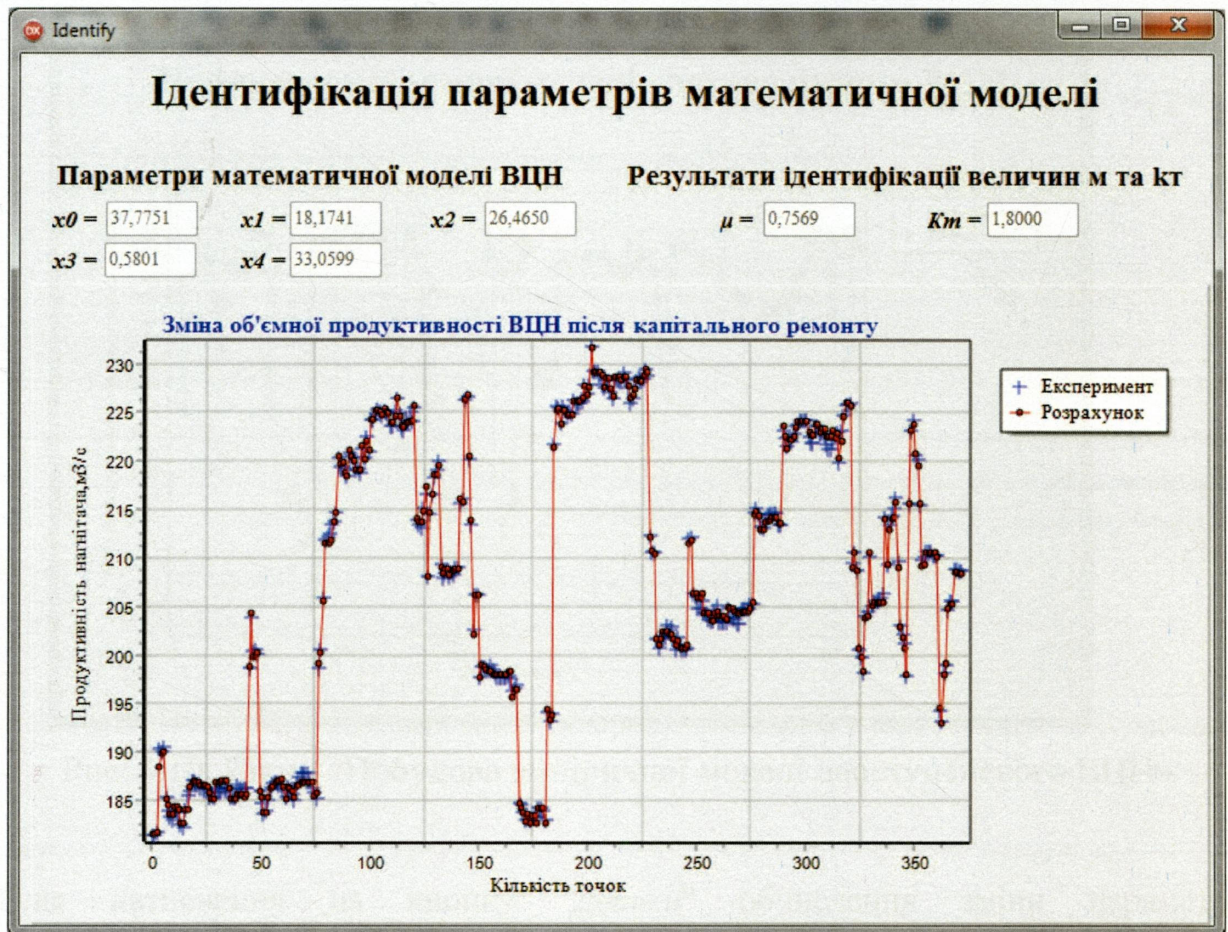


Рис. 4.9. Вікно «Ідентифікація параметрів математичної моделі»

У цьому вікні наведено параметри математичної моделі ВЦН  $X_i^{(0)}$ , результати ідентифікації величин  $\mu$ ,  $k_T$  та графік зміни значень об'ємної продуктивності нагнітача після КР. Після виходу з цієї форми відбувається перехід до основного вікна програми.

Після натиснення на кнопку "Деталі" побудови емпіричної моделі двоступеневого ВЦН відбувається перехід на нову форму з відповідною назвою (рис 4.10).

У цьому вікні наведено результат синтезу емпіричної моделі ВЦН. Після виходу з цієї форми відбувається перехід до основного вікна програми.



Рис. 4.10. Вікно «Побудова емпіричної моделі двоступеневого ВЦН»

Після натиснення на кнопку "Деталі" обчислення зміни параметрів двоступеневого ВЦН відбувається перехід на нову форму з відповідною назвою (рис. 4.11).

Calculation

### Обчислення зміни параметрів технічного стану двоступеневого ВЦН

$\Delta x_1 = 1,2690$  %

$\Delta x_2 = 2,4613$  %

$\Delta x_3 = 5,0552$  %

Рис. 4.11. Вікно «Обчислення зміни параметрів технічного стану двоступеневого ВЦН»

У цьому вікні наведено значення зміни параметрів двоступеневого ВЦН  $\Delta x_i$ ,  $i = \overline{0,3}$ , за якими проводиться експертна оцінка поточного стану проточної частини

ВЦН в основній формі з назвою "Main" (рис. 4.8). Після виходу з цієї форми відбувається перехід до основного вікна програми.

Основний функціонал цього програмного забезпечення зосереджений у скрипті Unit1.pas, що відповідає основній формі.

Блок програми, що відповідає за виконання сценарію KS3\_ga\_August, наведено нижче:

```
V:=CreateOleObject('Matlab.Application');
V.Execute('KS3_ga_August');
```

**Так реалізується передача параметрів x0–x4 з Matlab:**

```
x0:=VarArrayCreate([1,1],varDouble);
x0i:=VarArrayCreate([1,1],varDouble);
V.GetFullMatrix('X0','base',VarArrayRef(x0),VarArrayRef(x0i));
x1:=VarArrayCreate([1,1],varDouble);
x1i:=VarArrayCreate([1,1],varDouble);
V.GetFullMatrix('X1','base',VarArrayRef(x1),VarArrayRef(x1i));
x2:=VarArrayCreate([1,1],varDouble);
x2i:=VarArrayCreate([1,1],varDouble);
V.GetFullMatrix('X2','base',VarArrayRef(x2),VarArrayRef(x2i));
x3:=VarArrayCreate([1,1],varDouble);
x3i:=VarArrayCreate([1,1],varDouble);
V.GetFullMatrix('X3','base',VarArrayRef(x3),VarArrayRef(x3i));
x4:=VarArrayCreate([1,1],varDouble);
x4i:=VarArrayCreate([1,1],varDouble);
V.GetFullMatrix('X4','base',VarArrayRef(x4),VarArrayRef(x4i));
```

**Так реалізується передача параметрів mu та kt з Matlab:**

```
m:=VarArrayCreate([1,1],varDouble);
mi:=VarArrayCreate([1,1],varDouble);
V.GetFullMatrix('mu','base',VarArrayRef(m),VarArrayRef(mi));
kt:=VarArrayCreate([1,1],varDouble);
kti:=VarArrayCreate([1,1],varDouble);
V.GetFullMatrix('kt','base',VarArrayRef(kt),VarArrayRef(kti));
```

**Так реалізується передача матриць K, Q<sub>N</sub>, Q1<sub>N</sub> з Matlab:**

```
n:=VarArrayCreate([1,1],varDouble);
ni:=VarArrayCreate([1,1],varDouble);
V.GetFullMatrix('N','base',VarArrayRef(n),VarArrayRef(ni));
n1:=n[1];
k1:=VarArrayCreate([1,n1],varDouble);
```

```

k1_i:=VarArrayCreate([1,n1],varDouble);
V.GetFullMatrix('K','base',VarArrayRef(k1),VarArrayRef(k1_i));
Q_n:=VarArrayCreate([1,n1],varDouble);
Q_ni:=VarArrayCreate([1,n1],varDouble);
V.GetFullMatrix('Q_N','base',VarArrayRef(Q_n),VarArrayRef(Q_ni));
Q1_n:=VarArrayCreate([1,n1],varDouble);
Q1_ni:=VarArrayCreate([1,n1],varDouble);
V.GetFullMatrix('Q1_N','base',VarArrayRef(Q1_n),VarArrayRef(Q1_ni
));

```

#### Реалізація заповнення відповідних полів форми:

```

Identify.Edit1.Text:=FloatToStrF(x0[1],ffFixed,:0,4);
Identify.Edit2.Text:=FloatToStrF(x1[1],ffFixed,10,4);
Identify.Edit3.Text:=FloatToStrF(x2[1],ffFixed,10,4);
Identify.Edit4.Text:=FloatToStrF(x3[1],ffFixed,10,4);
Identify.Edit5.Text:=FloatToStrF(x4[1],ffFixed,10,4);
Identify.Edit6.Text:=FloatToStrF(m[1],ffFixed,10,4);
Identify.Edit7.Text:=FloatToStrF(kt[1],ffFixed,10,4);

```

Реалізація побудови графіка залежності значень об'ємної продуктивності нагнітача від технологічних параметрів:

```

Identify.chart1.leftaxis.title.caption:='Продуктивність
нагнітача,м3/с';
Identify.chart1.bottomaxis.title.caption:='Кількість';
for i := 1 to n1 do begin
Identify.Series2.AddXY(k1[i],Q_n[i]);
Identify.Series1.AddXY(k1[i],Q1_n[i]);
end;

```

Така організація забезпечує компактне відображення великої кількості графіків та текстової інформації, дозволяючи швидко переключатися між ними. Повний текст програми-інтегратора наведено у додатку I.

Отже, в цьому розділі розроблено структуру комп'ютерної системи контролю параметрів двоступеневого ВЦН, що забезпечує поетапний розв'язок задачі контролю параметрів двоступеневого ВЦН та інтегрована в існуючу систему керування процесом. Також розроблено прикладний програмний продукт підтримки



задачі контролю параметрів двоступеневого ВЦН, написаний об'єктно-орієнтованою мовою Delphi, із можливістю його інтегрування в існуюче програмне забезпечення SCADA-системи Citect. Результати зазначених досліджень у цьому розділі наведені в праці [127].

### **Висновки до розділу**

1. Розроблено блок-схему алгоритму системи контролю параметрів двоступеневого ВЦН, що встановлює черговість отримання інформації від давачів, способів аналізу інформації та порядок представлення її оператору.

2. Описано структуру програм, інтегрованих у програмне забезпечення SCADA-системи Citect Богородчанського ЛВУМГ, що дає змогу визначити взаємодію програм як необхідну умову для успішної експлуатації ВЦН-650-21-2 у промислових умовах.

3. Запропоновано структуру комп'ютерної системи контролю параметрів двоступеневого ВЦН, що забезпечує поетапний розв'язок задачі контролю його параметрів, та інтегровано її в існуючу систему керування процесом.

4. Розроблено прикладний програмний продукт підтримки задачі контролю параметрів двоступеневого ВЦН-650-21-2, що дає можливість інтегрувати його в існуюче програмне забезпечення.

5. Програмне забезпечення апробоване на КС-39 «Прогрес» Богородчанського ЛВУМГ, що засвідчує його працездатність і ефективність.

## 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 одноступневих нагнітачів. Оскільки більшість КС України використовують двоступеневі нагнітачі природного газу, то в роботі розроблено математичну модель двоступеневого відцентрового нагнітача природного газу (2.31), особливістю якої є те, що вона враховує втрати на витіки 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 (2.39) 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 ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Довідник інженера диспетчерської служби / за заг. ред. канд. техн. наук Ю. В. Пономарьова та М. П. Химка. Київ : УЦЕБОПнафтогаз, 2009. 245 с.
2. Чалаєв Д. М. Рациональное використання газоперекачувальних агрегатів. *Трубопровідний транспорт*. 2013. № 1 (79). С. 28–29.
3. Грудз В. Я., Грудз Я. В., Костів В. В., Михалків В. Б., Тараєвський О. С., Тимків Д. Ф. Технічна діагностика трубопровідних систем : монографія. Івано-Франківськ : Лілея-НВ, 2012. 512 с.
4. Костюк А. Г. Динамика и прочность турбомашин : учебник. 3-е изд., перераб. и доп. Москва : ИД МЭИ, 2007. 476 с.
5. Иноземцев А. А., Сандрацкий В. Л. Газотурбинные двигатели. Пермь : ОАО «Авиадвигатель», 2006. 1203 с.
6. Отт К. Ф. Том III. Газоперекачивающие агрегаты. Югорск : ООО «Тюментрансгаз», 2007. 214 с.
7. Замиховский Л. М., Матвиенко Р. М. Построение интеллектуальной системы поддержки принятия решений при управлении технологическим процессом компримирования газа. *Scientific Journal «ScienceRice»*. 2015. № 4/2 (9). С. 54–58.
8. 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.
9. Ревзин Б. С. Газотурбинные газоперекачивающие агрегаты. Москва : Недра, 1986. 212 с.
10. Ксенич А. І., Васьковський М. І. Енергоощадні режими роботи компресорних станцій. *Трубопровідний транспорт*. 2013. № 4 (82). С. 18–19.
11. Ивановский Н. Н., Криворотько В. Н. Центробежные нагнетатели природного газа. : учебное пособие. Москва : Недра, 1994. 176 с.
12. Козаченко А. Н. Эксплуатация компрессорных станций магистральных газопроводов. Москва : Нефть и газ, 1999. 463 с.

13. Дубинин М. М. Компрессорные установки в нефтяной и газовой промышленности. Москва : Недра, 1970. 184 с.
14. Ільченко Б. С. Діагностування функціонально-технічного стану газоперекачувальних агрегатів: монографія. Харків : ХНАМГ, 2011. 228 с.
15. Рис В. Ф. Центробежные компрессорные машины : 3-е изд., перераб. и доп. Ленинград : Машиностроение, 1981. 351 с.
16. Галеркин Ю. Б., Козаченко Л. И. Турбокомпрессоры : учеб. пособие. Санкт-Петербург : изд-во Политехн. ун-та, 2008. 374 с.
17. Ваняшов А. Д. Теория, расчет и конструирование компрессорных машин. Омск : изд-во ОмГТУ, 2007. 270 с.
18. Селезнев К. П., Галеркин Ю. Б. Центробежные компрессоры. Ленинград : Машиностроение, 1982. 271 с.
19. Галиуллин З. Т., Леонтьев Е. В. Интенсификация магистрального транспорта газа. Москва : Недра, 1991. 271 с.
20. Парафейник В. П., Смирнов А. В., Тертышный И. Н., Нефедов А. Н. Анализ режимов работы ГПА с газотурбинным приводом на стадии проектирования агрегата. *Авиационно-космическая техника и технология*. 2011. № 9. С. 25–32.
21. Завальный П. Н., Ревзин Б. С. Повышение эффективности использования центробежных нагнетателей ГПА в газотранспортных системах. Екатеринбург : УГТУ, 1999. 105 с.
22. Зарицкий С. П., Семичасонов В. Г. Достоверность и эффективность диагностирования ГПА. *Научно-тех. сборник. Диагностика оборудования и трубопроводов*. 2002. № 4. С. 3–6.
23. Скріпка О. А. Контроль технічного стану відцентрових нагнітачів газоперекачувальних агрегатів на принципах нейронних мереж : дис. ...канд. тех. наук : 05.11.13. Івано-Франківськ, 2007. 222 с.
24. Ziegler Kai U., Heinz Gallus F., Reinhard N. A study on impeller-diffuser interaction. Pt. 1. Influence on the performance. *Trans. ASME. J. Turbomach.* 2003. № 1. P. 173–182.

25. Ippen A. T. The Influence of Viskosity on Centrifugal Pump Performace. *Trans. ASME. J. Turbomach.* 2002. № 68. P. 823–848.
26. Shum V. K., Tan C. S., Cumpsty N. A. Impeller-diffuser interaction in centrifugal compressor. *Trans. ASME. J. Turbomach.* 2000. № 4. P. 777–786.
27. Черкасский В. М. Насосы, вентиляторы, компрессоры : учебник для теплоэнергетических специальностей вузов. 2-е изд., перераб. и доп. Москва : Энергоатомиздат, 1984. 416 с.
28. Селезнев К. П., Галеркин Ю. Б., Савин Б. Н. Проектирование и оптимизация проточной части промышленных центробежных компрессоров с использованием ЭВМ : учеб. пособие. Ленинград : ЛГТУ, 1990. 76 с.
29. Михайлов А. К., Малющенко В. В. Конструкции и расчет центробежных насосов высокого давления. Москва : Машиностроение, 1971. 304 с.
30. Дилигенская А. Н. Идентификация объектов управления. Самара : Самарский государственный технический университет, 2009. 130 с.
31. Lobanoff Val S., Ross Robert R. Centrifugal Pumps: Design and Applicatio. 2nd Edition. Gulf Professional Publishing, 1992. 640 p.
32. Кузьо І. В., Шоловій Ю. П., Флюнт О. Р. Розвиток методів діагностики основного обладнання компресорних станцій. *Трубопровідний транспорт.* 2013. № 6 (84). С. 18–20.
33. Ніцета В. В. Щодо класифікації систем технічної діагностики. *Нафтова і газова промисловість.* 2010. № 2. С. 47–52.
34. Иванов В. А., Сапожников А. В. Системные признаки совокупности процессов эксплуатации компрессорных станций. *Тез. доклада в рамках второй научной школы-семинара молодых ученых и аспирантов.* Тюмень : ТГУ, 2005. С. 32–37.
35. Пархоменко П. П., Карибский В. В., Согомонян Е. С., Халчев В. Ф. Основы технической диагностики. Книга 1. Модели объектов, методы и алгоритмы диагноза. Москва : Энергия, 1976. 464 с.
36. Harihara P. Parasuram, Parlos Alexander G. Fault diagnosis of centrifugal

pumps using motor electrical signals. USA, Texas : A&M University, 2012. 32 p.

37. ДСТУ 2389:1994. Терміни та визначення. Технічне діагностування та контроль технічного стану. [Чинний від 1995-01-01]. Вид. офіц. Київ : Держстандарт України, 1994. 24 с.

38. Ніщета В. В., Овчинніков В. П., Мамонов О. І., Таргонський В. О. Застосування мікропроцесорної техніки для ідентифікації явищ, пов'язаних з помпажем. *Нафтова і газова промисловість*. 2008. № 2. С. 57–59.

39. Giampalo T. Gas Turbine Handbook: Principles and Practices. London: Published by the Fairmont Press, Inc., 2006. 437 p.

40. Бурау Н. И., Игнатович С. Р., Тяпченко А. Н. Результаты экспериментальных исследований виброакустического метода свободных колебаний для диагностики роторных элементов авиационных двигателей. *Авіаційно-космічна техніка і технологія*. 2003. № 40/5. С.79–81.

41. Бурау Н. И., Сопилка Ю. В. Методологические аспекты виброакустического мониторинга состояния лопаток ГТУ. *Авиационно-космическая техника и технология*. 2006. № 9/35. С. 162–166.

42. Замиховский Л. М., Павлык В. В. Исследование диагностических признаков технического состояния газоперекачивающих агрегатов ГТК-25і фирмы Нуово-Пиньоне. *Молодой учёный*. 2014. № 15 (74). С. 75–80.

43. Яворський І. М., Юзефович Р. М., Кравець І. Б., Мацько І. Й., Стецько І. Г. Розробка вібродіагностичної системи для визначення дефектів промислового обладнання з використанням методів нестационарної статистичної обробки вібраційних та акустичних коливань. *Техническая диагностика и неразрушающий контроль*. 2015. № 4. С. 36–41.

44. A. Albraik, F. Althobiani, F. Gu, A. Ball. Diagnosis of Centrifugal Pump Faults Using Vibration Methods. URL: <http://iopscience.iop.org/article/10.1088/1742-6596/364/1/012139/pdf/>

45. Zanolli Z., Astolfi G., Marczyk J. Complexity-based methodology for Fault Diagnosis: application on a centrifugal machine. *2012 IFAC Conference on Analysis and*

*Control of Chaotic Systems*. (Mexico, June 20 - June 22. 2012). Mexico, 2012. P. 51–56.

46. Marczyk J. A New Theory of Risk and Rating. New tools for surviving in a complex and turbulent economy. Trento: Editrice, Uni service. 2011. 234 p.

47. Lomario D., Fattore L., De Poli, Marczyk J. Complexity-based approach to robust design and structural assessment of aero engine components. *ASME Turbo Expo Conference*. Montreal, Canada. 2007. P. 67–71.

48. Higman E., Perovic S. Predictive maintenance of pumps based on signal analysis of pressure and differential pressure (flow) measurements. *Trans. Of the Institute of Measurement and Control*. 2001. № 4 (23). P. 226–248.

49. Epstein A. H., Williams Ffowcs J. E., Greitzer E. M. Active suppression of aerodynamic instabilities in turbomachines. *In Proc. 10<sup>th</sup> AIAA Aeroacoustics Conf.* USA, Seattle. 1986. P. 86–94.

50. Wood B. M., Olsen C. L., Hartzo G. D., Rama J. C., Szenasi F. R. Development of an 11,000 r/min, 3500 hp induction motor and adjustable speed drive for refinery service. *In IEEE Transactions on Industry Applications*. 1997. № 3 (33). P. 815–825.

51. Козырев В. Т. Автоколебательная аэротермоакустика газотурбинных двигателей. Москва : МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2005. 456 с.

52. Shengzhong Huang. Immune Genetic Evolutionary Algorithm of Wavelet Neural Network to Predict the Performance in the Centrifugal Compressor and Research. *Journal of Software*. 2011. № 5. P. 908–914.

53. Горбійчук М. І., Скріпка О. А. Метод обчислення базових значень діагностичних ознак відцентрового нагнітача природного газу. *Методи та прилади контролю якості*. 2005. № 15. С. 36–40.

54. Horbiychuk M. I., Humeniuk T. V., Povarchuk D. D. Fuzzy Identification of Technological Objects. *Energy Engineering and Control Systems*. 2015. № 1(1). P. 35–42.

55. Горбійчук М. І., Когутяк М. І., Ковалів Є. О. Нейрообчислювачі параметрів нагнітачів природного газу. *Нафтова і газова промисловість*. 2002. № 5. С. 39–41.

56. Казак В. М., Шевчук Д. О., Гасіджак В. С. Діагностика основних елементів газотранспортної системи за фактичним технічним станом з використанням



інтелектуальних технологій. *Проблеми інформатизації та управління*. 2008. № 24. С. 102–106.

57. Ed Wilcox. Practical methods for field performance testing centrifugal compressors. URL: <http://turbolab.tamu.edu/proc/turboproc/T28/Vol28017.pdf>

58. Halimi D., Hafaifa A., Boualie E. Maintenance actions planning in industrial centrifugal compressor based on failure analysis. *Eksplotacja i Niezawodność – Maintenance and Reliability*. 2014. № 16 (1). P.17–21.

59. Кантюков Р. Р., Тахавиев М. С., Гилязиев М. Г., Лебедев Р. В., Варсегов В. Л. Разработка математической модели участка газотранспортной системы. *Транспорт и хранение нефтепродуктов и углеводородного сырья*. 2015. № 2. С. 3–6.

60. Ільченко Б. С., Прищепо О. О. Оцінювання технічного стану газоперекачувальних агрегатів. *Трубопровідний транспорт*. 2013. № 5 (83). С. 30–31.

61. Горбійчук М. І., Копей Б. В., Щупак І. В., Беллаур А. Інформаційні показники технічного стану газоперекачувальних агрегатів природного газу. *Методи і прилади контролю якості*. 2008. № 20. С. 47–50.

62. Сафарбаков А. М., Лукьянов А. В., Пахомов С. В. Основы технической диагностики деталей и оборудование : учебное пособие. Иркутск : ИрГУПС, 2007. 128 с.

63. Сафарбаков А. М., Лукьянов А. В., Пахомов С. В. Основы технической диагностики : учебное пособие. Иркутск : ИрГУПС, 2006. 216 с.

64. Возняк М. П., Юрчило Т. В. Діагностування технічного стану нагнітача газоперекачувального агрегату з використанням реальних режимних параметрів його роботи. *Науковий вісник ІФНТУНГ*. 2012. № 2 (32). С. 67–75.

65. Кучер В. Я. Основы технической диагностики и теории надежности : письменные лекции. Санкт-Петербург : СЗТУ, 2004. 47 с.

66. Горбійчук М. І., Пістун Є. П. Числові методи і моделювання на ЕОМ : навчальний посібник. Івано-Франківськ : Факел, 2010. 449 с.

67. Ахмедзянов А. М., Дубравский Н. Г., Тунаков А. П. Диагностика состояния ВРД по термогазодинамическим параметрам. Москва : Машиностроение, 1983. 206 с.

68. Деев В. С., Кулешов Н. Н. Техническая диагностика сложных объектов : учебное пособие. Часть 1 : Физические модели отказов. Москва : Мир, 2000. 60 с.

69. Ковалко М. П., Грудз В. Я., Михалків В. Б., Тимків Д. Ф., Шлапак Л. С., Ковалко О. М. Трубопровідний транспорт газу : монографія. Київ : Арена Еко, 2002. 600с.

70. Замиховский Л. М., Петрив С. Я. Математическое моделирование процесса теплообмена в регенераторе газоперекачивающего агрегата с использованием аппарата обратных задач. *ScienceRise*. 2015. № 4 (2). С. 49–54.

71. Поршаков Б. П., Лопатин А. С., Купцов С. М., Шотиди К. Х. Газоперекачивающие агрегаты с газотурбинным приводом на магистральных газопроводах. Москва : ГУП Издательство «Нефть и газ» РГУ нефти и газа И. М. Губкина, 2003. 240 с.

72. Грудз В. Я., Мыхалкив В. Б., Манько В. З. Построение характеристик ГПА по данным диспетчерской службы. *Разведка и разработка нефтяных и газовых месторождений*. 1986. № 23. С. 84–85.

73. Яковлев Е. И., Александров А. В. Проектирование и эксплуатация систем дальнего транспорта газа. Москва : Недра, 1974. 432 с.

74. Слободчиков К. Ю. Математическое и информационное обеспечение системы управления компрессорного цеха газоперекачивающих агрегатов. *Автоматизация в промышленности*. 2004. № 7. С. 38–42.

75. Михайлова А. Б. Газодинамический расчет осевого компрессора в двумерной постановке с использованием имитационного моделирования. *Вестник УГАТУ Т16*. 2012. № 2 (47). С. 15–27.

76. Прищепо О. О. Удосконалення режимів роботи газоперекачувальних агрегатів на основі їх фактичних характеристик : дис. ... канд. тех. наук : 05.14.06. Харків, 2002. 169 с.

77. Инструкция по эксплуатации агрегата ЕГПА-25РЧ. Прага : зав. №2805647, 1996.

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

79. Страхович К. И., Френкель М. И., Кондрашов И. К., Рис. В. Ф. Компрессорные машины. Москва : Госиздат торговой литературы, 1961. 600 с.

80. Чистяков В. М., Романенко Н. Т., Фролов Е. С. Центробежные компрессорные машины. Москва : Машиностроение, 1969. 328 с.

81. Ахмедзянов А. М., Дубравский Н. Г., Тунаков А. П. Диагностика состояния ВРД по термогазодинамическим параметрам. Москва : Машиностроение, 1983. 206 с.

82. 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.

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

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

85. 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.

86. Вержбицкий В. М. Основы численных методов : учебник для вузов. Москва : Высш. шк., 2002. 840 с.

87. Шуфнарівич М. А. Система інтелектуальної підтримки прийняття рішень в умовах невизначеності при керуванні об'єктами природокористування : дис. ... канд. тех. наук : 05.13.07. Івано-Франківськ, 2014. 199 с.

88. Горбійчук М. І., Когутяк М. І., Скріпка О. А. Діагностична модель відцентрового нагнітача природного газу. *Нафтова і газова промисловість*. 2006. № 2. С. 36–38.

89. Панченко Т. В., Тарасевич Ю. Ю. Генетические алгоритмы : учебно-методическое. Астрахань : Издательский дом «Астраханский университет», 2007. 87 с.

90. Субботін С. О., Олійник А. О., Олійник О. О. Неітеративні, еволюційні та мультиагентні методи синтезу нечіткологічних і нейромережних моделей : монографія. Запоріжжя : ЗНТУ, 2009. 375 с.

91. Ивахненко А. Г., Коппа Ю. В., Степашко В. С. Справочник по типовым программам моделирования. Київ : Техніка, 1980. 180 с.

92. Ивахненко А. Г. Индуктивный метод самоорганизации моделей сложных систем. Київ : Наукова думка, 1981. 286 с.

93. Ивахненко А. Г. Метод групового урахування аргументів – конкурент методу стохастичної апроксимації. *Автоматика*. 1968. № 3. С. 58–72.

94. Ивахненко А. Г. Долгосрочное прогнозирование и управление сложными системами. Киев : Техніка, 1975. 311 с.

95. Ивахненко А. Г., Степашко В. С. Помехоустойчивость моделирования. Киев : Наук. думка, 1985. 216 с.

96. Ivachnenko A. G., Muller J. A. Selbstorganisation von Vorhersagemodellen. Berlin : Veb Verlag Technik, 1984. 223 p.

97. Гуменюк Т. В. Оптимальне керування процесом поглиблення нафтогазових свердловин в умовах невизначеності : дис. ... канд. тех. наук : 05.13.07. Івано-Франківськ, 2016. 192 с.

98. Onwubolu G. GMDH-Methodology and Implementation in Matlab. London : Imperial College Press, 2015. 284 p.

99. Nariman-Zadeh N. Pareto Genetic Design of GMDH-type Neural Networks for

Nonlinear

Systems.

URL:

<http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.443.8792&rep=rep1&type=pdf>

100. GMDH method for data mining, forecasting, fuzzy models analysis, statistical learning networks and predictive software systems. URL: <http://www.gmdh.net/>

101. Горбійчук М. І., Когутяк М. І., Василенко О. Б., Щупак І. В. Метод синтезу емпіричних моделей на засадах генетичних алгоритмів. *Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ*. 2009. № 4(33). С. 72–79.

102. Івахненко О. Г., Лапа В. Г. Передбачення випадкових процесів. Київ : Наукова думка, 1969. 420 с.

103. Формуляр капітального ремонту ГПА з приводом від електродвигуна ЕГПА-25. Боярка : філія ВРТП «УКГАЗЕНЕРГОСЕРВІС», 17 липня 2011. 23 с.

104. Заячук Я. І. Оптимальне керування газоперекачувальними агрегатами компресорних станцій з урахуванням їх технічного стану : дис. ... канд. тех. наук : 05.13.07. Івано-Франківськ, 2009. 213 с.

105. Химмельблау Д. Анализ процессов статистическими методами. Москва : Мир, 1973. 957 с.

106. 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.

107. 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.

108. 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.

109. 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.

110. Горбийчук М. И., Медведчук В. М. Анализ параллельного алгоритма синтеза эмпирических моделей на принципах генетических алгоритмов. *Международный научно-технический журнал «Проблемы управления и информатики»*. 2016. № 1. С. 112–130.

Gorbiychuk Mikhail I., Lazoriv Alla N., Medvedchuk Vera M. 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.

111. 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.

112. Семенцов Г. Н., Фадеева О. В. Метод вибору кількості термів для нечіткого опису базових змінних в F-перетворенні параметрів і показників процесу буріння свердловин. *Вісник Хмельницького національного університету*. 2005. Ч. 1. Т. 1. С. 30–35.

113. Семенцов Г. Н., Чигур І. І., Шавранський М. В., Борин В. С. Фаззі-логіка в системах контролю : навч. посібник. Івано-Франківськ : Факел, 2002. 70 с.

114. Семенцов Г. Н., Фадеева О. В. Аналіз та вибір форми функцій належності для фазифікації вхідних сигналів систем. *Вісник Хмельницького національного університету*. 2006. № 1 (78). С. 219–225.

115. Sementsov G., Chigur I., Zhurakivski O. Fuzzy models of technological processes in oil and gas industry. *Proceeding of Fuzzy 96. Zittau*. 1996. P. 296–302.

116. Раскин Л. Г., Серая О. В. Нечеткая математика. Основы теории. Приложения. Харьков : Парус, 2008. 352 с.

117. Раскин Л. Г., Серая О. В. Аналитическое описание функций

принадлежности бинечетких чисел. *Системы обработки информации*. 2015. № 7. С. 93–97.

118. Штовба С. Д. Проектирование нечетких систем средствами Matlab. Москва : Горячая линия – Телеком, 2007. 288 с.

119. Ротштейн А. П., Штовба С. Д. Нечеткая надежность алгоритмических процессов. Винница : Континент-ПРИН, 1997. 142 с.

120. Блюмин С. Л., Шуйкова И. А. Модели и методы принятия решений в условиях неопределенности. Липецк : ЛЭГИ, 2001. 138 с.

121. Чигур І. І. Фазі-моделювання та автоматизований контроль відпрацювання шарошkových доліт в умовах невизначеності процесу буріння. *Науковий вісник Національного технічного університету нафти і газу*. 2001. № 1. С. 81–86.

122. Рутковская Д., Пилиньский М., Рутковский Л. Нейронные сети, генетические алгоритмы и нечеткие системы. Пер. с польск. И. Д. Рудинского. Москва : Горячая линия – Телеком, 2006. 452 с.

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

124. Горбійчук М. І., Пендерецький О. В., Шуфнарівч М. А. Метод оцінки стану ґрунтів з використанням fuzzy-технологій. *Восточно-европейский журнал передовых технологий*. 2008. № 3/5 (33). С. 29–32.

125. 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.

126. Ротштейн О. П., Штовба С. Д. Проектування нечітких баз знань. Вінниця : ВДТУ, 1999. 63 с.

127. 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.

128. Елизаров И. А., Третьяков А. А., Пчелинцев А. Н. Интегрированные системы проектирования и управления: Scada-системы : учебное пособиею Тамбов : изд-во ФГБОУ ВПО «ТГТУ», 2015. 160 с.

129. Ковалів Є. О. Оптимізація роботи газоперекачувальних агрегатів з різними типами приводів. *Нафтогазова енергетика*. 2007. № 2 (3). С. 80–86.

130. Заячук Я. І. Комп'ютерна система оптимального керування роботою відцентрових нагнітачів природного газу. *Вісник Хмельницького національного університету*. 2010. № 1. С. 258–263.

131. Михеев В. А. Автоматизация процессов. Самара : Самар. гос. аэрокосм. ун-т им. С. П. Королева, 2012. 166 с.

132. Горбійчук М. І., Скріпка О. А., Когутяк М. І., Прокіпчин С. В. Комп'ютерна система поетапного діагностування роботи відцентрових нагнітачів природного газу. *Енергетика, контроль та діагностика об'єктів нафтогазового комплексу*. 2007. № 1 (2). С. 67–71.

133. Заячук Я. І. Система адаптивного управління процесом компримування природного газу. *Нафтогазова енергетика*. 2008. № 3 (8). С. 131–136.



# ДОДАТКИ

## ДОДАТОК А

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

Gorbiychuk 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.

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.

9. Гарасимів В. М., Гарасимів Т. Г., Мойсеєнко О. В. Система оцінювання технічного стану проточної частини двоступеневого нагнітача природного газу на основі нечіткої логіки. *Методи та прилади 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.

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.

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.

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.

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, 2014. P. 75–78.

## ДОДАТОК Б

Розв'язок рівняння (2.30) стосовно продуктивності нагнітача природного газу

$$\left(\frac{\varepsilon}{k_v} - 1\right) A = n_{II}^2 \left( \left( 1 + 0,5(1 + k_v + 2k_{v1}) \frac{K_{np}}{q} \right) \left( X_0 - q \left( \frac{X_1}{k_{v1}} + \frac{X_2}{k_v} \right) \right) + K_T \frac{k_{v1} + k_v}{q} \right). \quad (2.30)$$

З урахуванням того, що  $q = \frac{Q_1}{\omega}$ , вираз (2.30) набуде такого вигляду:

$$\left(\frac{\varepsilon}{k_v} - 1\right) A = n_{II}^2 \left( \left( 1 + 0,5(1 + k_v + 2k_{v1}) \frac{K_{np} \cdot \omega}{Q_1} \right) \left( X_0 - \frac{Q_1}{\omega} \left( \frac{X_1}{k_{v1}} + \frac{X_2}{k_v} \right) \right) + \omega \cdot K_T \frac{k_{v1} + k_v}{Q_1} \right);$$

З правої частини останнього рівняння винесемо за дужки  $Q_1$ :

$$\left(\frac{\varepsilon}{k_v} - 1\right) A = \frac{n_{II}^2}{Q_1} \left( \left( Q_1 + 0,5K_{np} \cdot \omega(1 + k_v + 2k_{v1}) \right) \left( X_0 - \frac{Q_1}{\omega} \left( \frac{X_1}{k_{v1}} + \frac{X_2}{k_v} \right) \right) + \omega \cdot K_T \cdot (k_{v1} + k_v) \right);$$

$$\frac{\left(\frac{\varepsilon}{k_v} - 1\right)}{n_{II}^2} A Q_1 = -\frac{1}{\omega} \left( \frac{X_1}{k_{v1}} + \frac{X_2}{k_v} \right) Q_1^2 + \left( X_0 - 0,5K_{np} (1 + k_v + 2k_{v1}) \left( \frac{X_1}{k_{v1}} + \frac{X_2}{k_v} \right) \right) Q_1 +$$

$$+ 0,5X_0 \omega K_{np} (1 + k_v + 2k_{v1}) + \omega K_T (k_{v1} + k_v);$$

$$-\frac{1}{\omega} \left( \frac{X_1}{k_{v1}} + \frac{X_2}{k_v} \right) Q_1^2 + \left( X_0 - 0,5K_{np} (1 + k_v + 2k_{v1}) \left( \frac{X_1}{k_{v1}} + \frac{X_2}{k_v} \right) - \frac{\left(\frac{\varepsilon}{k_v} - 1\right)}{n_{II}^2} A \right) Q_1 +$$

$$+ 0,5X_0 \omega K_{np} (1 + k_v + 2k_{v1}) + \omega K_T (k_{v1} + k_v) = 0.$$

Виконавши відповідні математичні операції, отримали таке квадратне рівняння:

$$\frac{1}{\omega} \left( \frac{X_1}{k_{v_1}} + \frac{X_2}{k_v} \right) Q_1^2 - \left( X_0 - 0,5K_{np} (1 + k_v + 2k_{v_1}) \left( \frac{X_1}{k_{v_1}} + \frac{X_2}{k_v} \right) - \frac{\left( \frac{\varepsilon}{k_v} - 1 \right) A}{n_{II}^2} \right) Q_1 -$$

$$-\omega \left( 0,5X_0K_{np} (1 + k_v + 2k_{v_1}) + K_T \cdot (k_{v_1} + k_v) \right) = 0.$$

Введемо позначення:  $\alpha_0 = \frac{X_1}{k_{v_1}} + \frac{X_2}{k_v}$ ;

$$\alpha_1 = \left( \frac{\varepsilon}{k_v} - 1 \right) \frac{A}{n_{II}^2} - X_0 + 0,5(1 + k_v + 2k_{v_1}) \left( \frac{X_1}{k_{v_1}} + \frac{X_2}{k_v} \right) X_3;$$

$\alpha_2 = 0,5(1 + k_v + 2k_{v_1})X_0X_3 + X_4$ , де  $X_3 = K_{np}$ ;  $X_4 = K_T(k_{v_1} + k_v)$ . Отримаємо:

$$\frac{\alpha_0}{\omega} \cdot Q_1^2 + \alpha_1 \cdot Q_1 - \omega \cdot \alpha_2 = 0.$$

Знайдемо дискримінант  $D = b^2 - 4ac = \alpha_1^2 - 4 \cdot \alpha_0 \cdot \alpha_2$ .

Корені визначаємо за формулою  $x_{1,2} = \frac{-b \pm \sqrt{D}}{2a}$ . Оскільки  $Q_1 > 0$ , то:

$$Q_1 = \frac{-\alpha_1 + \sqrt{\alpha_1^2 - 4 \cdot \alpha_0 \cdot \alpha_2}}{2 \frac{\alpha_0}{\omega}} = -0,5 \frac{\alpha_1}{\alpha_0} \omega + 0,5 \omega \frac{\sqrt{\alpha_1^2 - 4 \cdot \alpha_0 \cdot \alpha_2}}{\alpha_0};$$

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

## ДОДАТОК В

### Знаходження часткових похідних лінеаризованої математичної моделі контролю параметрів двоступеневого нагнітача природного газу

Знайдемо часткові похідні, що входять до формули:

$$\Delta Q_1 = \sum_{i=1}^n \frac{\partial \varphi(\bar{X})}{\partial X_i} \Delta X_i, \quad i = 3 \quad (2.32)$$

Введемо такі позначення:  $r_1 = \frac{\alpha_1}{\alpha_0}$  і  $r_2 = \frac{\alpha_2}{\alpha_0}$ . Тоді формулу (2.31) можна

записати так:

$$Q_1 = \omega \left( -\frac{r_1}{2} + \sqrt{\left(\frac{r_1}{2}\right)^2 + r_2} \right).$$

Знайдемо часткові похідні, що входять до формули (2.32):

$$\begin{aligned} \frac{\partial \varphi(\bar{X})}{\partial X_i} &= \frac{\omega}{2} \cdot \left( \frac{1}{\sqrt{\left(\frac{r_1}{2}\right)^2 + r_2}} \cdot \left( \frac{r_1}{2} \cdot \frac{\partial r_1}{\partial X_i} + \frac{\partial r_2}{\partial X_i} \right) - \frac{\partial r_1}{\partial X_i} \right); \\ \frac{\partial \varphi(\bar{X})}{\partial X_i} &= \frac{\omega}{2\sqrt{\left(\frac{r_1}{2}\right)^2 + r_2}} \cdot \left( \frac{r_1}{2} \cdot \frac{\partial r_1}{\partial X_i} + \frac{\partial r_2}{\partial X_i} - \frac{\partial r_1}{\partial X_i} \cdot \sqrt{\left(\frac{r_1}{2}\right)^2 + r_2} \right); \\ \frac{\partial \varphi(\bar{X})}{\partial X_i} &= \frac{\omega}{2\sqrt{\left(\frac{r_1}{2}\right)^2 + r_2}} \cdot \left( \frac{\partial r_1}{\partial X_i} \cdot \left( \frac{r_1}{2} - \sqrt{\left(\frac{r_1}{2}\right)^2 + r_2} \right) + \frac{\partial r_2}{\partial X_i} \right). \end{aligned}$$

Нехай  $r = \sqrt{\left(\frac{r_1}{2}\right)^2 + r_2}$ , тоді остання формула набуде такого вигляду:

$$\frac{\partial \varphi(\bar{X})}{\partial X_i} = \frac{\omega}{2r} \left( \left( \frac{r_1}{2} - r \right) \frac{\partial r_1}{\partial X_i} + \frac{\partial r_2}{\partial X_i} \right).$$

Враховуючи значення  $\alpha_0$ ,  $\alpha_1$  і  $\alpha_2$ , отримаємо

$$r_1 = \frac{\left( \frac{\varepsilon}{k_v} - 1 \right) \frac{A}{n_{\Pi}^2} - X_0 + 0,5(1 + k_v + 2k_{v1}) \left( \frac{X_1}{k_{v1}} + \frac{X_2}{k_v} \right) X_3}{\frac{X_1}{k_{v1}} + \frac{X_2}{k_v}};$$

$$r_2 = \frac{0,5(1 + k_v + 2k_{v1}) X_0 X_3 + X_4}{\frac{X_1}{k_{v1}} + \frac{X_2}{k_v}}.$$

Знайдемо часткову похідну  $\frac{\partial \varphi(\bar{X})}{\partial X_1}$ :

$$\frac{\partial \varphi(\bar{X})}{\partial X_1} = \frac{\omega}{2r} \left( \left( \frac{r_1}{2} - r \right) \frac{\partial r_1}{\partial X_1} + \frac{\partial r_2}{\partial X_1} \right).$$

Знайдемо  $\frac{\partial r_1}{\partial X_1}$  та  $\frac{\partial r_2}{\partial X_1}$ :

$$\frac{\partial r_1}{\partial X_1} = \frac{0,5(1 + k_v + 2k_{v1}) X_3 \cdot \left( \frac{X_1}{k_{v1}} + \frac{X_2}{k_v} \right) - \left( \left( \frac{\varepsilon}{k_v} - 1 \right) \frac{A}{n_{\Pi}^2} - X_0 + 0,5(1 + k_v + 2k_{v1}) \left( \frac{X_1}{k_{v1}} + \frac{X_2}{k_v} \right) X_3 \right)}{k_{v1} \cdot \left( \frac{X_1}{k_{v1}} + \frac{X_2}{k_v} \right)^2}$$

$$\frac{\partial r_1}{\partial X_1} = \frac{0,5(1 + k_v + 2k_{v1}) X_3}{k_{v1} \alpha_0} - \frac{\alpha_1}{k_{v1} \alpha_0^2} = \frac{1}{k_{v1} \alpha_0} (0,5(1 + k_v + 2k_{v1}) X_3 - r_1).$$

$$\frac{\partial r_2}{\partial X_1} = - \frac{0,5(1 + k_v + 2k_{v1}) X_0 X_3 + X_4}{k_{v1} \left( \frac{X_1}{k_{v1}} + \frac{X_2}{k_v} \right)^2} = - \frac{\alpha_2}{k_{v1} \alpha_0^2} = - \frac{r_2}{\alpha_0 \cdot k_{v1}}.$$

Отримали:

$$\frac{\partial \varphi(\bar{X})}{\partial X_1} = \frac{\omega}{2r} \left( \left( \frac{r_1}{2} - r \right) \left( \frac{1}{k_{v1} \alpha_0} (0,5(1 + k_v + 2k_{v1}) X_3 - r_1) \right) - \frac{r_2}{\alpha_0 \cdot k_{v1}} \right);$$



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

Знайдемо часткову похідну  $\frac{\partial \varphi(\bar{X})}{\partial X_2}$ :

$$\frac{\partial \varphi(\bar{X})}{\partial X_2} = \frac{\omega}{2r} \left( \left( \frac{r_1}{2} - r \right) \frac{\partial r_1}{\partial X_2} + \frac{\partial r_2}{\partial X_2} \right).$$

Знайдемо  $\frac{\partial r_1}{\partial X_2}$  та  $\frac{\partial r_2}{\partial X_2}$ :

$$= \frac{0,5(1 + k_v + 2k_{v1})X_3 \cdot \left( \frac{X_1}{k_{v1}} + \frac{X_2}{k_v} \right) - \left( \left( \frac{\varepsilon}{k_v} - 1 \right) \frac{A}{n_{\Pi}^2} - X_0 + 0,5(1 + k_v + 2k_{v1}) \left( \frac{X_1}{k_{v1}} + \frac{X_2}{k_v} \right) X_3 \right)}{k_v \left( \frac{X_1}{k_{v1}} + \frac{X_2}{k_v} \right)^2};$$

$$\frac{\partial r_1}{\partial X_2} = \frac{0,5(1 + k_v + 2k_{v1})X_3 \cdot \alpha_0 - \alpha_1}{k_v \alpha_0^2} = \frac{1}{k_v \alpha_0} (0,5(1 + k_v + 2k_{v1})X_3 - r_1).$$

$$\frac{\partial r_2}{\partial X_2} = - \frac{0,5(1 + k_v + 2k_{v1})X_0 X_3 + X_4}{k_v \cdot \left( \frac{X_1}{k_{v1}} + \frac{X_2}{k_v} \right)^2} = - \left( \frac{\alpha_2}{k_v \cdot \alpha_0^2} \right) = - \frac{r_2}{k_v \cdot \alpha_0}.$$

Отримали:

$$\frac{\partial \varphi(\bar{X})}{\partial X_2} = \frac{\omega}{2r} \left( \left( \frac{r_1}{2} - r \right) \left( \frac{1}{k_v \alpha_0} (0,5(1 + k_v + 2k_{v1})X_3 - r_1) \right) - \frac{r_2}{k_v \cdot \alpha_0} \right);$$

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

Знайдемо часткову похідну  $\frac{\partial \varphi(\bar{X})}{\partial X_3}$ :

$$\frac{\partial \varphi(\bar{X})}{\partial X_3} = \frac{\omega}{2r} \left( \left( \frac{r_1}{2} - r \right) \frac{\partial r_1}{\partial X_3} + \frac{\partial r_2}{\partial X_3} \right).$$

Знайдемо  $\frac{\partial r_1}{\partial X_3}$  та  $\frac{\partial r_2}{\partial X_3}$ :

$$\frac{\partial r_1}{\partial X_3} = r_1 = \frac{\left(\frac{\varepsilon}{k_v} - 1\right) \frac{A}{n_{\Pi}^2} - X_0 + 0,5(1 + k_v + 2k_{v1}) \left(\frac{X_1}{k_{v1}} + \frac{X_2}{k_v}\right) X_3}{\frac{X_1}{k_{v1}} + \frac{X_2}{k_v}};$$

$$\frac{\partial r_2}{\partial X_3} = \frac{0,5(1 + k_v + 2k_{v1}) X_0}{\frac{X_1}{k_{v1}} + \frac{X_2}{k_v}} = \frac{0,5(1 + k_v + 2k_{v1}) X_0}{\alpha_0}.$$

Отримали:

$$\frac{\partial \varphi(\bar{X})}{\partial X_3} = \frac{\omega}{2r} \left( 0,5 X_3 \left( \frac{r_1}{2} - r \right) (1 + k_v + 2k_{v1}) + \frac{0,5(1 + k_v + 2k_{v1}) X_0}{\alpha_0} \right);$$

$$\frac{\partial \varphi(\bar{X})}{\partial X_3} = \frac{\omega}{2r} \left( 0,5 \cdot (1 + k_v + 2k_{v1}) \cdot \left( X_3 \left( \frac{r_1}{2} - r \right) + \frac{X_0}{\alpha_0} \right) \right);$$

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

Отже, отримали такі часткові похідні:

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

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

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

## ДОДАТОК Г

## Програма ідентифікації параметрів двоступеневого ВЦН природного газу із використанням ГА

```

%=====
%Формування матриці даних КС "Богородчани" (КС-39 "Прогрес"
% Богородчанського ЛВУ МГ(2011)
%=====
load n_August
load Pinp_August
load Pout_August
load Pkf_August
load tinp_August
load tout_August
load Pa_August
%n-частота обертання робочого колеса, об/хв;
%pinp-тиск газу на вході в нагнітач, кгс/см^2
%rout-тиск газу на виході з нагнітача, кгс/см^2
%rkon-перепад тиску на конфузори компресора нагнітача, кгс/см^2
%t1-температура газу на вході в нагнітач, град.С
%t2-температура газу на виході з нагнітача, град.С
%patm-атмосферний тиск, мм рт. ст.
par_August=[n_August Pinp_August Pout_August Pkf_August...
            tinp_August tout_August Pa_August];
np_A=par_August(:,1);
pinp_A=par_August(:,2);
P1_A=pinp_A./10.19716;%тиск газу на вході в нагнітач, МПа
rout_A=par_August(:,3);
P3_A=rout_A./10.19716;%тиск газу на виході з нагнітача, МПа
rkon_A=par_August(:,4);
Pkon_A=rkon_A/10.19716;%перепад тиску на конфузори компресора
нагнітача, МПа
tinp_A=par_August(:,5);
T1_A=tinp_A+273;%температура газу на вході в нагнітач, К
tout_A=par_August(:,6);
T3_A=tout_A+273;%температура газу на виході з нагнітача, К
Pat_A=par_August(:,7);
%-----
%Обчислення відносної густини природного газу стосовно повітря
Rrov=287.1; %газова стала повітря, Дж/кг*К
ro_rov=1.205; %густина повітря за стандартних умов, кг/м^3
VCN4_A=95.144;% об'ємна концетрація метану, %
VC2H6_A=2.496; %об'ємна концетрація етану, %
VC3H8_A=0.712;%об'ємна концетрація пропану, %
VC4H10_A=0.223;%об'ємна концетрація бутанів, %
VC5H12_A=0.046;%об'ємна концетрація пентанів, %
VC6H14_A=0.014;%об'ємна концетрація гексанів+вищ., %

```

```

VN2_A=0.891;%об'ємна концентрація азоту, %
VCO2_A=0.465;%об'ємна концентрація діоксиду вуглецю, %
VO2_A=0.009;%об'ємна концентрація кисню, %
MCH4=16; MC2H6=30; MC3H8=44; MC4H10=58; MC5H12=72; MC6H14=86;
MN2=28; MCO2=44; MO2=32; %молекулярні маси компонентів
M_A=(VCH4_A*MCH4+VC2H6_A*MC2H6+VC3H8_A*MC3H8+VC4H10_A*MC4H10+...
      VC5H12_A*MC5H12+VC6H14_A*MC6H14+VN2_A*MN2+VCO2_A*MCO2+...
      VO2_A*MO2)/100; % середня молекулярна маса газу
ro_A=M_A/22.4; %густина газу, кг/м^3
Lamda_A=ro_A/ro_pov;
R_A=R_pov/Lamda_A;%Газова стала природного газу, Дж/(кг*К)
%-----
%Обчислення коефіцієнта стисливості
%Вхід:
%ro-густина природного газу за стандартних умов
%(Tst=293K; Pst=0,1013 МПа)
%Pat-атмосферний тиск, мм рт. ст.
%P1,P3-тиск природного газу на вході і виході ВЦН, МПа
%tinp,tout-температура природного газу на вході і виході ВЦН,
град.С
%Вихід:
%Z1,Z3-коефіцієнти стисливості на вході і виході ВЦН
z1_A=fun_ZM_August(ro_A,Lamda_A,Pat_A,P1_A,tinp_A);
z3_A=fun_ZM_August(ro_A,Lamda_A,Pat_A,P3_A,tout_A);
Z1_A=z1_A';Z3_A=z3_A';
Pa1_A=P1_A+1.33e-4*Pat_A;%Абсолютний тиск природного газу на
вході ВЦН,МПа
Pa3_A=P3_A+1.33e-4*Pat_A;%Абсолютний тиск природного газу на
виході ВЦН,МПа
%-----
%Обчислення об'ємної продуктивності нагнітача
%Вхід:
%Pkon-перепад тиску на конфузори компресора нагнітача, кгс/см^2
%R-газова стала природного газу, Дж/(кг*К)
%T1-температура природного газу на вході нагнітача, К
%Ak-коефіцієнт об'ємної продуктивності конфузора, м^2.5/хв
%Z1-коефіцієнт стисливості на вході ВЦН
%pinp-тиск газу на вході в нагнітач, кгс/см^2
%Вихід:
%Q-продуктивність нагнітача за умов всмоктування, куб.м/с
Ak=3500;
aq=Pkon_A./P1_A;
bq=Pkon_A*0.1033.*Z1_A.*T1_A;
cq=ro_A.*293.15.*(P1_A+0.1033);
Q_A=Ak*(1-aq).*sqrt(bq./cq);
%-----
%Обчислення Kpr та геометричних характеристик нагнітача
Beta1=35;beta1=Beta1*pi/180;
Beta2=48;beta2=Beta2*pi/180;
D1=0.58;D2=1.08;d=D1/D2;

```

```

R1=D1/2;R2=D2/2;
a=1.2;
z=11;
b11=0.091;b12=0.083;
b21=0.054;b22=0.046;
alfa=0.7;
s=0.7e-1;
Ds=0.6e-1;
Zs=4;
delta=25e-3;
kt=1.07;
s1=a+(1.2*sin(beta2)); s2=z*(1-(d^2));
mu=1/(1+(s1/s2));
s3=z*delta; s4=pi*D2*sin(beta2);
tau=1-s3/s4;
F12=pi*D1*b12;%площа вхідного поперечного січення другого
робочого колеса
F21=pi*D2*b21*tau;%площа вихідного поперечного січення першого
робочого колеса
F22=pi*D2*b22*tau;%площа вихідного поперечного січення другого
робочого колеса
s5=(R2*cot(beta2))/(F21); s6=(R1*cot(beta1))/(F12);
s7=sqrt((3/Zs)*((R2^2)-(R1^2)));
Kpr=0.5*alfa*pi*s*Ds*s7;
%-----
%Обчислення тиску P2 та температури T2
P2_A=sqrt(P1_A.*P3_A);
Pa2_A=P2_A+1.33e-4*Pat_A;
deltat1_A=(tout_A-tinp_A)/2;%підвищення температури газу після
першої ступені
t2_A=tinp_A+deltat1_A;%температура газу на виході із першої
ступені,град.С
T2_A=t2_A+273;
z2_A=fun_ZM_August(ro_A,Lamda_A,Pat_A,P2_A,t2_A);
Z2_A=z2_A';
kv_A=(Pa3_A./Pa1_A).*((Z1_A.*T1_A)./(Z3_A.*T3_A));
kv1_A=(Pa2_A./Pa1_A).*((Z1_A.*T1_A)./(Z2_A.*T2_A));
%-----
%Обчислення ступеня підвищення тиску газу
ns_A=np_A./60;%частота обертання робочого колеса, об/с;
omega_A=2*pi.*ns_A;%кутова швидкість колеса нагнітача, об/с
T0=288;R0=451;Z0=0.92;%параметри зведення
A0=Z0*T0*R0;
nnom=3700/60;%номінальна частота обертання робочого колеса,об/с
omeganom=2*pi*nnom;
npr_A=(ns_A./nnom).*sqrt(A0./(Z1_A.*R_A.*T1_A));
A=A0./(omeganom.^2);
epselon_A=Pa3_A./Pa1_A;%Ступінь підвищення тиску газу
s10_A=epselon_A./kv_A;s11_A=(s10_A-1).*(A./(npr_A.^2));
%-----

```

```

%Генетичний алгоритм
%-----
[x
fval,Q1_A]=run_KS3_min_August(D2,R2,R1,s5,s6,beta2,F22,kv1_A,kv_A,s11_
A,Kpr,Q_A,omega_A);
%-----
%Візуалізація результатів обчислень
%-----
N=length(Q1_A);
figure
K=1:N;
plot(K,Q_A,'ro-',K,Q1_A,'b+-')
grid on
title('Зміна об'ємної продуктивності ВЦН 650-21-2 за місяць
серпень 2011-го року')
xlabel('Кількість точок')
ylabel('Продуктивність нагнітача, м^3/с')
legend('Розрахунок','Експеримент')
%=====
%Перевірка адекватності моделі
%=====
«%Обчислення коефіцієнта кореляції K_Yu
Y=Q_A;y=Q1_A;
K_Yu=corrcoef(Y,y);
figure
plot(Y,y,'o')» [97, с.173]
%-----
%Обчислення середньоквадратичного відхилення
N=length(Y);
S_r=0;
for k=1:N
    S_r=S_r+(Y(k)-y(k))^2;
end
S_r=sqrt(S_r/(N-1));
%-----

```

### Файл-програми

```

function
[x,fval,Q1_A]=run_KS3_min_August(D2,R2,R1,s5,s6,beta2,F22,kv1_A,kv_A,s
11_A,Kpr,Q_A,omega_A)
%=====
%M-файл для - алгоритму з параметрами
%Обчислення функції нев'язки
%=====
%Налаштування генетичного алгоритму
options = gaoptimset;
% Запис цільової функціїoptions = gaoptimset;
options = gaoptimset(options,'PopInitRange',[0.3; 1.18]);

```

```

hybridopts
optimoptions('fminunc','Display','iter','Algorithm','quasi-newton');
options = gaoptimset(options,'HybridFcn',{@fminunc,hybridopts});
options=gaoptimset(options,'Generations',70,'PopulationSize',1000
,...
    'EliteCount',2,'StallGenLimit',200,...
    'MigrationDirection','forward','MigrationFraction',0.01,...

'CrossoverFraction',0.8,'CrossoverFcn',@crossoverheuristic,...
    'PlotFcns',{@gaplotbestf, @gaplotbestindiv,
@gaplotdistance,@gaplotchange});
% Нижні та верхні межі рішень генетичного алгоритму
LB=[0.3 0.6];
UB=[1.8 1.18];
%Вихідні значення генетичного алгоритму
[x, fval] = ga(@nestedfun,2,[],[],[],[],LB,UB,[],options);
% Запис цільової функції
function f=nestedfun(x)
    Kt=x(1)*((D2^5)/8);
    bx0=x(2)*(2*(R2^2)-(R1^2));
    bx1=x(2)*(s5-s6);
    bx2=x(2)*(R2*cot(beta2))/(F22);
    s8_A=bx1./kv1_A;s9_A=bx2./kv_A;
    alfa0_A=s8_A+s9_A;
    alfa1_A=s11_A-bx0+0.5*Kpr.*(1+kv_A+2.*kv1_A).*alfa0_A;
    alfa2_A=0.5*Kpr*bx0.*(1+kv_A+2*kv1_A)+Kt.*(kv1_A+kv_A);
    q1_A=alfa1_A./alfa0_A;q2_A=alfa2_A./alfa0_A;
%-----
%Продуктивність нагнітача,куб.м/с
    Q1_A=omega_A.*(-0.5*q1_A+sqrt(0.25*(q1_A.^2)+q2_A));
    e=Q_A-Q1_A;
    f=0.5*(e^e);
end
end

function Z=fun_ZM_August(ro_A,Lamda_A,Pat_A,P_A,t_A)
%Коефіцієнт стисливості газу
%ro-густина природного газу за стандартних умов
%Pat-атмосферний тиск
%P-тиск природного газу
%t-температура природного газу
Pkp=4.67-0.1*Lamda_A;
Tkp=99.8+162.8*Lamda_A;
PI=(P_A+1.33e-4*Pat_A)/Pkp;
tau=(t_A+273)/Tkp;
a=(0.1237./tau-0.3468./tau.^2-0.1188./tau.^4).*PI;
b=(0.0291./tau.^2-0.0273./tau.^3+0.039./tau.^5).*PI.^2;
n=length(a);
I=ones(n,1);

```

```
p=[I -I -a -b];
for i=1:n
    P_A=p(i,:);
    r=roots(P_A);
    m=length(r);
    k=1;
    for j=1:m
        if and(imag(r(j))==0,r(j)>0)
            z(k)=r(j);
            k=k+1;
        end
    end
    Z(i)=min(z);
end
```



## ДОДАТОК Д

**Програма ідентифікації параметрів двоступеневого ВЦН природного газу із  
використанням методу Нелдера-Міда**

```

%=====
%Ідентифікація параметрів двоступеневого ВЦН природного
газу:метод Нелдера-Міда
%НАГНІТАЧ
%=====
%=====
%Формування матриці даних КС-39 «Прогрес»
%Богородчанського ЛВУМГ УМГ «Прикарпаттрансгаз»
%=====
load n_August
load Pinp_August
load Pout_August
load Pkf_August
load tinp_August
load tout_August
load Pa_August%n-частота обертання робочого колеса, об/хв;
%Pinp-тиск газу на вході в нагнітач,кгс/см^2
%Pout-тиск газу на виході з нагнітача,кгс/см^2
%Pkf-перепад тиску на конфузори компресора нагнітача, кгс/см^2
%tinp-температура газу на вході в нагнітач, град.С
%tout-температура газу на виході з нагнітача, град.С
%Pa-атмосферний тиск, мм рт. ст.
par_August=[n_August Pinp_August Pout_August Pkf_August...
tinp_August tout_August Pa_August];
np_A=par_August(:,1);
pinp_A=par_August(:,2);
P1_A=pinp_A./10.19716;%тиск газу на вході в нагнітач, МПа
pout_A=par_August(:,3);
P3_A=pout_A./10.19716;%тиск газу на виході з нагнітача, МПа
pkon_A=par_August(:,4);
Pkon_A=pkou_A/10.19716;%перепад тиску на конфузори компресора
нагнітача,МПа
tinp_A=par_August(:,5);
T1_A=tinp_A+273;%температура газу на вході в нагнітач,К
tout_A=par_August(:,6);
T3_A=tout_A+273;%температура газу на виході з нагнітача,К
Pat_A=par_August(:,7);
%-----
%Обчислення відносної густини природного газу стосовно повітря
Rrov=287.1; %газова стала повітря, Дж/кг*К
ro_rov=1.205; %густина повітря за стандартних умов, кг/м^3
VCH4_A=95.144;% об'ємна концентрація метану, %
VC2H6_A=2.496; %об'ємна концентрація етану, %

```

```

VC3H8_A=0.712;%об'ємна концентрація пропану, %
VC4H10_A=0.223;%об'ємна концентрація бутанів, %
VC5H12_A=0.046;%об'ємна концентрація пентанів, %
VC6H14_A=0.014;%об'ємна концентрація гексанів+вищ., %
VN2_A=0.891;%об'ємна концентрація азоту, %
VCO2_A=0.465;%об'ємна концентрація діоксиду вуглецю, %
VO2_A=0.009;%об'ємна концентрація кисню, %
MCH4=16; MC2H6=30; MC3H8=44; MC4H10=58; MC5H12=72; MC6H14=86;
MN2=28; MCO2=44; MO2=32; %молекулярні маси компонентів
M_A=(VCH4_A*MCH4+VC2H6_A*MC2H6+VC3H8_A*MC3H8+VC4H10_A*MC4H10+...
      VC5H12_A*MC5H12+VC6H14_A*MC6H14+VN2_A*MN2+VCO2_A*MCO2+...
      VO2_A*MO2)/100; % середня молекулярна маса газу
ro_A=M_A/22.4; %густина газу, кг/м^3
Lamda_A=ro_A/ro_pov;
R_A=Rпов/Lamda_A;%Газова стала природного газу, Дж/(кг*К)
%-----
%Обчислення коефіцієнта стисливості
%Вхід:
%ro-густина природного газу за стандартних умов
%(Tst=293K; Pst=0,1013 МПа)
%Pat-атмосферний тиск, мм рт. ст.
%P1,P3-тиск природного газу на вході і виході ВЦН, МПа
%tinp,tout-температура природного газу на вході і виході ВЦН,
град.С
%Вихід:
%Z1,Z3-коефіцієнти стисливості на вході і виході ВЦН
z1_A=fun_ZM_August(ro_A,Lamda_A,Pat_A,P1_A,tinp_A);
z3_A=fun_ZM_August(ro_A,Lamda_A,Pat_A,P3_A,tout_A);
Z1_A=z1_A';Z3_A=z3_A';
Pa1_A=P1_A+1.33e-4*Pat_A;%Абсолютний тиск природного газу на
вході ВЦН,МПа
Pa3_A=P3_A+1.33e-4*Pat_A;%Абсолютний тиск природного газу на
виході ВЦН,МПа
%-----
%Обчислення об'ємної продуктивності нагнітача
%Вхід:
%rkon-перепад тиску на конфузори компресора нагнітача, кгс/см^2
%R-газова стала природного газу, Дж/(кгс*К)
%T1-температура природного газу на вході нагнітача,К
%Ак-коефіцієнт об'ємної продуктивності конфузора, м^2.5/хв
%Z1-коефіцієнт стисливості на вході ВЦН
%rinp-тиск газу на вході в нагнітач,кгс/см^2
%Вихід:
%Q-продуктивність нагнітача за умов всмоктування, куб.м/с
Ak=3600;
aq=Pkon_A./P1_A;
bq=Pkon_A*0.1033.*Z1_A.*T1_A;
cq=ro_A.*293.15.*(P1_A+0.1033);
Q_A=Ak*(1-aq).*sqrt(bq./cq);
%-----

```

```

%Обчислення тиску P2 та температури T2
P2_A=sqrt(P1_A.*P3_A);
Pa2_A=P2_A+1.33e-4*Pat_A;
deltat1_A=(tout_A-tinp_A)/2;%підвищення температури газу після
першої ступені
t2_A=tinp_A+deltat1_A;%температура газу на виході з першої
ступені,град.С
T2_A=t2_A+273;
z2_A=fun_ZM_August(ro_A,Lamda_A,Pat_A,P2_A,t2_A);
Z2_A=z2_A';
kv_A=(Pa3_A./Pa1_A).*((Z1_A.*T1_A)./(Z3_A.*T3_A));
kv1_A=(Pa2_A./Pa1_A).*((Z1_A.*T1_A)./(Z2_A.*T2_A));
%-----
%Обчислення ступеня підвищення тиску газу
ns_A=np_A./60;%частота обертання робочого колеса, об/с;
omega_A=2*pi.*ns_A;%кутова швидкість колеса нагнітача, об/с
T0=288;R0=451;Z0=0.92;%параметри зведення
A0=Z0*T0*R0;
nnom=3700/60;%номінальна частота обертання робочого колеса,об/с
omeganom=2*pi.*nnom;
npr_A=(ns_A./nnom).*sqrt(A0./(Z1_A.*R_A.*T1_A));
A=A0./(omeganom.^2);
epselon_A=Pa3_A./Pa1_A;%Ступінь підвищення тиску газу
tz=epselon_A./kv_A;
s10_A=epselon_A./kv_A;s11_A=(s10_A-1).*(A./(npr_A.^2));
%-----
%Початкові значення параметрів технічного стану
X1=0.4253;X2=0.2046;X3=2.9798;X4=0.0018;X5=0.1851;
a=[X1;X2;X3;X4;X5];%Початкове значення вектора параметрів
%-----
%Мінімізація функції невязки
%-----
%Nf-граничне значення кількості циклів
%tev-лічильник циклів
tev=0;
Nf=10;
[x_opt,f_min]=Min_NelderMid_Q(a,tz,kv_A,kv1_A,A,npr_A,omega_A,tev
,Q_A,Nf);
q=fun_q(x_opt,tz,kv_A,kv1_A,A,npr_A,omega_A);
N=length(q);
sigma=2*f_min/(N-1);
K=1:N;
%-----
%Візуалізація результатів обчислень
%-----
figure
plot(K,q','o-',K,Q_A,'+-')
grid on
title('Зміна об'ємної продуктивності ВЦН 650-21-2 за місяць
серпень 2011-го року')

```

```

xlabel('Кількість точок')
ylabel('Продуктивність нагнітача, м^3/с')
legend('Розрахунок', 'Експеримент')
«Обчислення коефіцієнта кореляції K_Yy
Y=Q_A; y=q;
K_Yy=corrcoef(Y, y);
figure
plot(Y, y, 'o')» [97, с.173]
%-----
%Обчислення середньоквадратичного відхилення
N=length(Y);
S_r=0;
for k=1:N
    S_r=S_r+(Y(k)-y(k))^2;
end
S_r=sqrt(S_r/(N-1));
%Вивід результатів

```

### Файл-програми

```

function
[x_opt, f_min]=Min_NelderMid_Q(a, tz, kv_A, kv1_A, A, npr_A, omega_A, tev, Q_A,
N_max)
%=====
%Мінімізація функції f(x) багатьох змінних методом Нелдера
%Міда. Функція f(x), яка підлягає мінімізації, заноситься
%в M-файл fun_NelderMid
%=====
%Вхід: N-розмірність вектора змінних
%      t-довжина ребра симплекса
%      alfa, beta, gama-параметри алгоритму
%      N_max-максимальна кількість ітерацій
%      epselon-точність розв'язку задачі мінімізації
%      show-показує кількість обчислень функції, яка підлягає
%            мінімізації (show=1)
%      t-довжина ребра симплексу
%Вихід: x_opt-значення x, в якому функція f(x) набуває
%        мінімального значення
%        f_min-мінімальне значення функції при x=x_opt
%-----
t=0.001;
N=length(a);
alfa=1;
beta=0.5;
gama=2;
epselon=1e-3;
sig=1;
ix=0;
in=0;
%-----

```

```

%Будуємо початковий симплекс, одна із вершин якого
%розміщена у точці a0
sq=sqrt(N+1);
sq_2=sqrt(2);
d1=t*(sq+N-1)/(N*sq_2);
d2=t*(sq-1)/(N*sq_2);
for i=1:N
for j=1:N
    if i==j
        V1(i,j)=d1+a(j);
    else
        V1(i,j)=d2+a(j);
    end
end
end
%L=zeros(N,1);
L=a;
%Vd=[L V1];
Vd=[L V1];
V=Vd';
%-----
%Початок алгоритму Нелдера Міда
ix=0;
while and((sig>epselon),(ix<N_max))
    ix=ix+1;
    %Обчислення xh i xl
    for j=1:N+1
        x=V(j,1:N);
[z,tev]=fun_NelderMid(x,tz,kv_A,kv1_A,A,npr_A,omega_A,tev,Q_A);
        f(j)=z;
    end
    [fh h]=max(f);
    [fl l]=min(f);
    x_l=V(l,:);
    x_h=V(h,:);
%-----
    %Обчислення центра ваги симплексу
    S=zeros(1,N);
    for j=1:N+1
        S=S+V(j,1:N);
    end
    in=in+1;
    x_n2=(S-V(h,1:N))/N;
    Sn(in,:)=x_n2;
%-----
    %Відображення
    x_n3=x_n2+alfa*(x_n2-x_h);
%-----
    %[f_xn3,tev]=fun_NelderMid(x_n3,tev);

```

```

[f_xn3,tev]=fun_NelderMid(x_n3,tz,kv_A,kv1_A,A,npr_A,omega_A,tev,
Q_A);
if f_xn3<f1
    %-----
    %Розтяг
    x_n4=x_n2+gama*(x_n3-x_n2);
    %-----
    %[f_xn4,tev]=fun_NelderMid(x_n4,tev);

[f_xn4,tev]=fun_NelderMid(x_n4,tz,kv_A,kv1_A,A,npr_A,omega_A,tev,Q_A);
    if f_xn4<f1
        x_h=x_n4;
        V(h,:)=x_h;
        %[sig,tev]=fun_stop(V,x_n2,tev);

[sig,tev]=fun_stop(V,x_n2,tz,kv_A,kv1_A,A,npr_A,omega_A,tev,Q_A);
        continue
    else
        x_h=x_n3;
        V(h,:)=x_h;
    end
    %[sig,tev]=fun_stop(V,x_n2,tev);

[sig,tev]=fun_stop(V,x_n2,tz,kv_A,kv1_A,A,npr_A,omega_A,tev,Q_A);
    continue
    else
        for j=1:N+1
            %[z,tev]=fun_NelderMid(V(j,:),tev);

[z,tev]=fun_NelderMid(V(j,:),tz,kv_A,kv1_A,A,npr_A,omega_A,tev,Q_A);
            f_i(j)=z;
            f(j)=f_xn3;
        end
        for j=1:N+1
            if j==h
                f(j)=[];
                f_i(j)=[];
            end
        end
        end
        if f>f_i
            if f_xn3>=fh
                x_h=x_n3;
                V(h,:)=x_h;
            end
            %-----
            %Стиснення
            x_n5=x_n2+beta*(x_h-x_n2);
            %-----
            %[f_xn5,tev]=fun_NelderMid(x_n5,tev);

```

```

[f_xn5,tev]=fun_NelderMid(x_n5,tz,kv_A,kv1_A,A,npr_A,omega_A,tev,Q_A);
    if f_xn5>fh
        for j=1:N+1
            %-----
            %Редукція
            s(j,:)=x_1+0.5*(V(j,:)-x_1);
            %-----
        end
        V=s;
        %[sig,tev]=fun_stop(V,x_n2,tev);

[sig,tev]=fun_stop(V,x_n2,tz,kv_A,kv1_A,A,npr_A,omega_A,tev,Q_A);
    continue
    else
        x_h=x_n5;
        V(h,:)=x_h;
    end

[sig,tev]=fun_stop(V,x_n2,tz,kv_A,kv1_A,A,npr_A,omega_A,tev,Q_A);
    continue
    else
        x_h=x_n3;
        V(h,:)=x_h;

[sig,tev]=fun_stop(V,x_n2,tz,kv_A,kv1_A,A,npr_A,omega_A,tev,Q_A);
    end
    end
    end
    %Результат розв'язку задачі мінімізації функції f(x)
    x_opt=min(V);
    %[f_min,tev]=fun_NelderMid(x_opt,tev);
    [f_min,tev]=fun_NelderMid(x_opt,tz,kv_A,kv1_A,A,npr_A,omega_A,tev
,Q_A);

```

```

function
[f,tev]=fun_NelderMid(X,tz,kv_A,kv1_A,A,npr_A,omega_A,tev,Q_A)
%=====
%Обчислення продуктивності нагнітача (метод
%Нелдера-Міда)
%Вхід:
%x-вектор параметрів моделі
%tz=epselon./kv
%omega-кутова швидкість ротора ВЦН,1/с
%kv=(Pa3./Pa1).*((Z1.*T1)./(Z3.*T3))
%kv1=(Pa2./Pa1).*((Z1.*T1)./(Z2.*T2))
%epsilon-ступінь підвищення тиску нагнітача
%Вихід:
%q-продуктивність нагнітача,куб.м/с

```

```

Y=(tz-1).*(A./(npr_A.^2));
alpha_0=(X(2)./kv1_A)+(X(3)./kv_A);
alpha_1=Y-
X(1)+0.5*(1+kv_A+2*kv1_A).*(X(2)./kv1_A)+(X(3)./kv_A).*X(4);
alpha_2=0.5*(1+kv_A+2*kv1_A)*X(1).*X(4)+X(5).*(kv1_A+kv_A);
r=alpha_1./alpha_0;
rx=alpha_2./alpha_0;
Rs=sqrt(0.25*(r.^2)+rx);
%Продуктивність нагнітача, куб.м/с
q=omega_A.*(-0.5*r+Rs);
e=Q_A-q;
f=0.5*(e'*e);
tev=tev+1;

function
[sig,tev]=fun_stop(V,x_n2,tz,kv_A,kv1_A,A,npr_A,omega_A,tev,Q_A)
N=length(x_n2);
[z,tev]=fun_NelderMid(x_n2,tz,kv_A,kv1_A,A,npr_A,omega_A,tev,Q_A);
fx=z;
s=0;
for j=1:N+1

[z,tev]=fun_NelderMid(V(j,:),tz,kv_A,kv1_A,A,npr_A,omega_A,tev,Q_A);
s=s+(z-fx)^2;
end
sig=sqrt(s/(N+1));

function q=fun_q(X,tz,kv_A,kv1_A,A,npr_A,omega_A)
%=====
%Обчислення продуктивності нагнітача
%Вхід:
%x-вектор параметрів моделі
%tz=tau*z
%ns-кутова швидкість ротора ВЦН,1/с
%kv=epsilon*tz
%epsilon-ступінь підвищення тиску нагнітача
%Вихід:
%q-продуктивність нагнітача, куб.м/с
Y=(tz-1).*(A./(npr_A.^2));
alpha_0=(X(2)./kv1_A)+(X(3)./kv_A);
alpha_1=Y-
X(1)+0.5*(1+kv_A+2*kv1_A).*(X(2)./kv1_A)+(X(3)./kv_A).*X(4);
alpha_2=0.5*(1+kv_A+2*kv1_A)*X(1).*X(4)+X(5).*(kv1_A+kv_A);
r=alpha_1./alpha_0;
rx=alpha_2./alpha_0;
Rs=sqrt(0.25*r.^2+rx);
%Продуктивність нагнітача, куб.м/с
q=omega_A.*(-0.5*r+Rs);

```



## ДОДАТОК Е

## Побудова емпіричної моделі двоступеневого ВЦН природного газу

```

%=====
%Емпірична модель: Продуктивність ВЦН (генетичний алгоритм)
%=====
%Формування матриці даних КС "Богородчани" (КС-39 "Прогрес"
% Богородчанського ЛВУ МГ за березень (2011)
load n_March
load Pinp_March
load Pout_March
load Pkf_March
load tinp_March
load tout_March
load Pa_March
%n-частота обертання робочого колеса, об/хв;
%pinp-тиск газу на вході в нагнітач, кгс/см^2
%pout-тиск газу на виході з нагнітача, кгс/см^2
%rkon-перепад тиску на конфузори компресора нагнітача, кгс/см^2
%t1-температура газу на вході в нагнітач, град.С
%t2-температура газу на виході з нагнітача, град.С
%patm-атмосферний тиск, мм рт. ст.
par_March=[n_March Pinp_March Pout_March Pkf_March...
    tinp_March tout_March Pa_March];
np_M=par_March(:,1);
pinp_M=par_March(:,2);
P1_M=pinp_M./10.19716;%тиск газу на вході в нагнітач, МПа
pout_M=par_March(:,3);
P3_M=pout_M./10.19716;%тиск газу на виході з нагнітача, МПа
rkon_M=par_March(:,4);
Pkon_M=rkon_M/10.19716;%перепад тиску на конфузори компресора
нагнітача, МПа
tinp_M=par_March(:,5);
T1_M=tinp_M+273;%температура газу на вході в нагнітач, К
tout_M=par_March(:,6);
T3_M=tout_M+273;%температура газу на виході з нагнітача, К
Pat_M=par_March(:,7);
%-----
%Обчислення відносної густини природного газу стосовно повітря
Rrov=287.1; %газова стала повітря, Дж/кг*К
ro_rov=1.205; %густина повітря за стандартних умов, кг/м^3
VCN4_M=95.144;% об'ємна концентрація метану, %
VC2H6_M=2.496; %об'ємна концентрація етану, %
VC3H8_M=0.712;%об'ємна концентрація пропану, %
VC4H10_M=0.223;%об'ємна концентрація бутанів, %
VC5H12_M=0.046;%об'ємна концентрація пентанів, %

```

```

VC6H14_M=0.014;%об'ємна концентрація гексанів+вищ., %
VN2_M=0.891;%об'ємна концентрація азоту, %
VCO2_M=0.465;%об'ємна концентрація діоксиду вуглецю, %
VO2_M=0.009;%об'ємна концентрація кисню, %
MCH4=16; MC2H6=30; MC3H8=44; MC4H10=58; MC5H12=72; MC6H14=86;
MN2=28; MCO2=44; MO2=32; %молекулярні маси компонентів
M_M=(VCH4_M*MCH4+VC2H6_M*MC2H6+VC3H8_M*MC3H8+VC4H10_M*MC4H10+...
      VC5H12_M*MC5H12+VC6H14_M*MC6H14+VN2_M*MN2+VCO2_M*MCO2+...
      VO2_M*MO2)/100; % середня молекулярна маса газу
ro_M=M_M/22.4; %густина газу, кг/м^3
Lamda_M=ro_M/ro_pov;
R_M=Rprov/Lamda_M;%Газова стала природного газу, Дж/(кг*К)
%-----
%Обчислення коефіцієнта стисливості
%Вхід:
%ro-густина природного газу за стандартних умов
%(Tst=293K; Pst=0,1013 МПа)
%Pat-атмосферний тиск, мм рт. ст.
%P1,P3-тиск природного газу на вході і виході ВЦН, МПа
%tinp,tout-температура природного газу на вході і виході ВЦН,
град.С
%Вихід:
%Z1,Z3-коефіцієнти стисливості на вході і виході ВЦН
z1_M=fun_ZM_March(ro_M,Lamda_M,Pat_M,P1_M,tinp_M);
z3_M=fun_ZM_March(ro_M,Lamda_M,Pat_M,P3_M,tout_M);
Z1_M=z1_M';Z3_M=z3_M';
Pa1_M=P1_M+1.33e-4*Pat_M;%Абсолютний тиск природного газу на
вході ВЦН,МПа
Pa3_M=P3_M+1.33e-4*Pat_M;%Абсолютний тиск природного газу на
виході ВЦН,МПа
ns_M=np_M./60;%частота обертання робочого колеса, об/с;
omega_M=2*pi.*ns_M;%кутова швидкість колеса нагнітача, об/с
%-----
%Обчислення об'ємної продуктивності нагнітача
%Вхід:
%rkon-перепад тиску на конфузори компресора нагнітача, кгс/см^2
%R-газова стала природного газу, Дж/(кгс*К)
%T1-температура природного газу на вході нагнітача, К
%Ak-коефіцієнт об'ємної продуктивності конфузора, м^2.5/хв
%Z1-коефіцієнт стисливості на вході ВЦН
%pinp-тиск газу на вході в нагнітач, кгс/см^2
%Вихід:
%Q-продуктивність нагнітача за умов всмоктування, куб.м/с
Ak=3500;
aq=Pkon_M./P1_M;
bq=Pkon_M*0.1033.*Z1_M.*T1_M;
cq=ro_M.*293.15.*(P1_M+0.1033);
Q_M=Ak*(1-aq).*sqrt(bq./cq);
%-----
save Q_M Q_M

```

```

Nv=length(Q_M);
K=1:Nv;
%-----
%Візуалізація результатів обчислень
%-----
figure
plot(K,Q_M,'o-')
%-----
«%ГЕНЕТИЧНИЙ АЛГОРИТМ
%-----
%ВХІД
%ct-найбільший степінь полінома
%X-масив вхідних даних (матриця розміром NxL)
%N-кількість дослідів; L-кількість змінних
%n-кількість хромосом у популяції
%ts-кількість хромосом у підгрупі
%nkk-максимальна кількість ітерацій генетичного алгоритму
%pc-ймовірність схрещування (0.5<=pc<=1)
%pm-ймовірність мутації (0<=pm<=0.1)
%N_A-Навчальна множина експериментальних даних
%N_B-перевірочна множина експериментальних даних
%N-загальне кількість точок N=N_A+N_B
%kl-вибір критерію селекції моделі
%   при kl=0 -критерій регулярності
%   при kl=1 -критерій зміщення
%epsilon-точність розв'язку задачі
%epsilon1-мінімальний приріст критерію селекції, що
%   визначає зупинку алгоритму
%zf-параметр "розрідження" масиву даних
%f0-вибір структури моделі:при f0=0 - вільний член завжди
%   наявний у структурі полінома; при f0=1 - така
%   наявність необов'язкова
%-----
XE=[P1_M P3_M T1_M T3_M omega_M Pat_M];
ct=3;
kl=0;
n=20;
pc=0.8;
pm=0.01;
ts=3;
nkk=500;
f0=0;
XX=[XE Q_M];
[M,nn]=size(XE);
for i=1:nn+1
XX(:,i)=(XX(:,i)-min(XX(:,i)))/(max(XX(:,i))-min(XX(:,i)));
end» [97, с.167]
[a,K_Yy,Y]=fun_Harasymiv_March(XX,ct,n,nkk,ts,pc,pm,kl,f0);

```

**Файл-програми**

```

function Z=fun_ZM_March(ro,Lamda,Pat,P,t)
%Коефіцієнт стисливості газу
%ro-густина природного газу за стандартних умов
%Pat-атмосферний тиск
%P-тиск природного газу
%t-температура природного газу
Pkp=4.67-0.1*Lamda;
Tkp=99.8+162.8*Lamda;
PI=(P+1.33e-4*Pat)/Pkp;
tau=(t+273)/Tkp;
a=(0.1237./tau-0.3468./tau.^2-0.1188./tau.^4).*PI;
b=(0.0291./tau.^2-0.0273./tau.^3+0.039./tau.^5).*PI.^2;
n=length(a);
I=ones(n,1);
p=[I -I -a -b];
for i=1:n
    P=p(i,:);
    r=roots(P);
    m=length(r);
    k=1;
    for j=1:m
        if and(imag(r(j))==0,r(j)>0)
            z(k)=r(j);
            k=k+1;
        end
    end
    Z(i)=min(z);
end

[a,K_Yy,y]=fun_Harasyriv_March(XX,ct,n,nkk,ts,pc,pm,kl,f0)
%=====
«%Метод групового врахування аргументів (генетичний алгоритм)
%=====МГУА=====
%Вихідні дані
%ct-найбільший степінь полінома
%X-масив вхідних даних (матриця розміром NxL)
%N-кількість дослідів; L-кількість змінних
%n-кількість хромосом у популяції
%ts-кількість хромосом у підгрупі
%nkk-максимальна кількість ітерацій генетичного алгоритму
%pc-ймовірність схрещування (0.5<=pc<=1)
%pm-ймовірність мутації (0<=pm<=0.1)
%N_A-Навчальна множина експериментальних даних
%N_B-перевірні множина експериментальних даних
%N-загальна кількість точок N=N_A+N_B
%kl-вибір критерію селекції моделі
%   при kl=0 -критерій регулярності

```

```

% при kl=1 -критерій зміщення
%epsilon-точність розв'язку задачі
%epsilon1-мінімальний приріст критерію селекції, що
% визначає зупинку алгоритму
%zf-параметр "розрідження" масиву даних
%f0-вибір структури моделі:при f0=0 - вільний член завжди
% наявний у структурі полінома; при f0=1 - така
% наявність необов'язкова» [97, с.168]
%-----
%Неохідні підпрограми:fod, Population, ch_new,
%fod_np, fun_perform_Gauss, fun_parametr, regi
%-----
«ea=1;
eal=1;
epsilon=0.000001;
epsilon1=eal*epsilon;
delta=ea*epsilon;
if round(n/2)-n/2~=0
    n=n-1;
end
%-----
[N Lz]=size(XX);
X=XX;
X(:,Lz)=[];
Y=XX(:,Lz);
L=Lz-1;
if kl==0
    N_A=round(0.7*N);
else
    N_A=round(0.5*N);
end
N_B=N-N_A;
X_A=X;
X_B=X;
X_A(N_A+1:N,:)=[];
X_B(1:N_A,:)=[];
Y_A=Y(1:N_A);
Y_B=Y(N_A+1:N);
%-----
%Формування матриці полінома P та матриці спостережень XD
XD_A=fod_np(ct,X_A);
XD_B=fod_np(ct,X_B);
[XD,Pol]=fod(ct,X);
%-----
%Формування популяції хромосом
%ch-матриця популяції
%k-кількість членів полінома
k=factorial(ct+L)/(factorial(ct)*factorial(L));
%-----
%Вибір початкової популяції хромосом

```

```

[Ch, ch]=Population(n, k, f0);
%-----
%Формування пулу родичів турнірним методом
for iz=1:nkk
for i=1:n
%Вибір випадковим чином ts хромосом із популяції
    ks=unidrnd(n,1,ts);
    CH=Ch(ks,:);
%-----
%Вибір найкращої хромосоми у групі
    for ki=1:ts
        if ki>1
            clear gh
        end
        Chh=CH(ki,:);
        t=1;
        if f0==1
            for j=1:k
                if Chh(j)==0
                    gh(t)=j;
                    t=t+1;
                end
            end
        else
            for j=1:k-1
                if Chh(j)==0
                    gh(t)=j+1;
                    t=t+1;
                end
            end
        end
        if t==1
            Fg=XD;
            Fg_A=XD_A;
            Fg_B=XD_B;
        else
            M=length(gh);
            if M==k
                L1=unidrnd(k,1,1);
                gh(L1)=[];
                Ch(ki,L1)=1;
            end
            Fg=XD;
            Fg_A=XD_A;
            Fg_B=XD_B;
            Fg(:,gh)=[];
            Fg_A(:,gh)=[];
            Fg_B(:,gh)=[];
        end
    end
end

```

```

%Система нормальних рівнянь та її розв'язок розпаралелиним
методом Гауса
[zm,zn]=size(Y);
if zm==1
    A_A=[Fg_A'*Fg_A Fg_A'*Y_A'];
else
    A_A=[Fg_A'*Fg_A Fg_A'*Y_A'];
end» [97, с.168-170]
[a_A, ier]=fun_perform_Gauss(A_A);
if ier==0
    error('Немає розв'язку')
end
«%Обчислення критерію селекції моделі
if kl==0
    %Критерій регулярності D_B
    y_m=Fg_B*a_A;
    if zm==1
        K_V(ki)=sum((Y_B'-y_m).^2)/sum(Y_B.^2);
    else
        K_V(ki)=sum((Y_B-y_m).^2)/sum(Y_B.^2);
    end
else
    %Критерій зміщення Ncm
    A_B=[Fg_B'*Fg_B Fg_B'*Y_B];» [97, с.170]
    [a_B, ier]= fun_perform_Gauss(A_B);
    if ier==0
        error('Немає розв'язку')
    end
    y_A=Fg*a_A;
    y_B=Fg*a_B;
    K_V(ki)=sum((y_A-y_B).^2)/sum(Y.^2);
end
end
end
[Kb_min,Ih]=min(K_V);
vt=ks(Ih);
Pch(i,:)=ch(vt,:);
K_ga(i)=Kb_min;
I_ga(i)=vt;
end
%-----
%Знаходження мінімального значення критерію відбору
[Kga_min,Ih]=min(K_ga);
delta=Kga_min;
if delta<=epsilon
    if iz==1
        ch=Pch;
    end
    break
end
if iz>1

```

```

DL=abs(Kga1-Kga_min);
if DL==0
    [Ch, ch]=Population(n, k, f0);
elseif DL<=epsilon1
    break
end
end
Kga1=Kga_min;
plot(iz, Kga_min, 'x')
hold on
%-----
%Застосування генетичних операторів
%Формуємо пари родичів
for j=1:2
    C(j,:)=unidrnd(n,1,n);
end
clear ch Ch
kc=0;
%Операція схрещування
for i=1:n/2
    if pc==1
        [ch1, ch2, chi1, chi2]=ch_new(k, C, i, Pch);
        %Новий пул родичів
        ch(i+kc,:)= [chi1 ch2];
        ch(i+kc+1,:)= [chi2 ch1];
        kc=kc+1;
    else
        Pc=unifrnd(0,1,1);
        if Pc<=pc
            [ch1, ch2, chi1, chi2]=ch_new(k, C, i, Pch);
            %Новий пул родичів
            ch(i+kc,:)= [chi1 ch2];
            ch(i+kc+1,:)= [chi2 ch1];
            kc=kc+1;
        else
            C1=C(1,i);
            C2=C(2,i);
            ch(i+kc,:)=Pch(C1,:);
            ch(i+kc+1,:)=Pch(C2,:);
            kc=kc+1;
        end
    end
end
end
%Операція мутації
if pm~=0
    for ii=1:n
        Pm=unifrnd(0,1,1);
        if Pm<=pm
            L2=unidrnd(k,1,1);
            if ch(ii,L2)==0

```



```

                ch(ii,L2)=1;
            else
                ch(ii,L2)=0;
            end
        else
            continue
        end
    end
end
if f0==1
    Ch=ch;
else
    Ch=ch;
    Ch(:,1)=[];
end
end
%-----
hold off
%Обчислення параметрів моделі
if iz==nkk
    fprintf('Зупинка алгоритму після досягнення nkk\r')
    [a,y,cn]=fun_parametr(XD,Y,ch,Ih,zm);
elseif DL<=epsilon1
    fprintf('Немає зменшення критерію селекції\r')
    [a,y,cn]=fun_parametr(XD,Y,ch,Ih,zm);
else
    fprintf('Досягнута задана точність розв'язку\r')
    fprintf('Кількість ітерацій i=%4.0f\r',iz)
    [a,y,cn]=fun_parametr(XD,Y,ch,Ih,zm);
end
%-----
%Вивід параметрів моделі
fprintf('Параметри моделі\r')
if t==1
for i=1:k
    fprintf('a%3.0f=%12.6f\r',i,a(i))
end
elseif t>1;
    nf=length(a);
    kn=1;
    for i=1:k
        if cn(i)==0
            as(i)=0;
            fprintf('a%3.0f=0\r',i)
        else
            for j=1:nf
                if j==kn
                    as(i)=a(j);
                    kn=kn+1;
                    fprintf('a%3.0f=%12.6f\r',i,as(i))
                end
            end
        end
    end
end

```

```

                                break
                                end
                            end
                        end
                    end
                end
            end
        end
    end
end
end
%-----
%Графічне відображення результатів моделювання
ny=length(y);
ty=1:ny;
figure» [97, с.170-173]
plot(ty,Y, '-o', ty, y, '-+')
grid on
title('Залежність об'ємної продуктивності нагнітача природного
газу від технологічних параметрів')
xlabel('Номер відліку')
ylabel('Продуктивність нагнітача, безрозм. одиниці')
legend('Розрахунок', 'Експеримент')
%=====
%Перевірка адекватності моделі
%=====
«%Обчислення коефіцієнта кореляції K_Yy
K_Yy=corrcoef(Y, y);
figure
plot(Y, y, 'o')» [97, с.173]
%-----
%Обчислення середньоквадратичного відхилення
N=length(Y);
S_r=0;
for k=1:N
    S_r=S_r+(Y(k)-y(k))^2;
end
S_r=sqrt(S_r/(N-1));
%-----
«%Обчислення коефіцієнтів лінійної регресії
p=polyfit(Y, y, 1);
P_corr=p(2)+p(1)*Y;
hold on
plot(Y, P_corr, 'r-')
%-----
%Побудова довірливих інтервалів
Sy=var(P_corr);
alpha=0.05;
Y_m=mean(Y);
N=length(Y);
S_y=Sy*(1/N+(Y.^2+Y_m^2)/sum((Y-Y_m).^2));
%Статистика Стьюдента
v=N-length(p); %число степенів свободи
p_t=1-alpha/2; %довірлива ймовірність
t_al=tinv(p_t, v);

```

```

%Dовірливі інтевали
s_y=sqrt(S_y);
U_t=P_corr+t_al*s_y;
U_b=P_corr-t_al*s_y;
[Y_s,ind]=sort(Y);
u_t=U_t(ind);
u_b=U_b(ind);
hold on
plot(Y_s,u_t,'bl-',Y_s,u_b,'bl-')
grid on
xlabel('Експериментальні значення об'ємної продуктивності Q_в_с,
безрозмірні одиниці')
ylabel('Розрахункові значення об'ємної продуктивності Q_1,
безрозмірні одиниці')»[97,с.173-174]

```

```

«function [XD,Pol]=fod(ct,X)
%=====
%Побудова системи умовних рівнянь для повного полінома зада-
%ного степеня від заданої кількості змінних
%=====
%Вхід
%ct-ступінь полінома
%L-кількість аргументів
%M-кількість точок початкового масиву
%X-масив значень вхідних аргументів (MxL)
%-----
%Вихід
%XД-масив даних розміру MxN, де N-кількість членів полінома
%-----
fprintf('Структура повного полінома \r')
fprintf('(без вільного члена)\r')
[M L]=size(X);
Pi(1:L)=0;
F=0;
for k=1:ct
    Pi(L)=k-1;
    Pi(1)=0;
    while Pi(1)<k
        Pi=regi(Pi,L,k+1);
        S=sum(Pi);
        while S~k
            Pi=regi(Pi,L,k+1);
            S=sum(Pi);
        end
        F=F+1;
        for j=L:-1:1
            fprintf('%4.2g',Pi(j))
        end
        fprintf('\r')
    end
end

```

```

    for i=1:M
        xd(i,F)=1;
    for j=1:L
        if Pi(L-j+1)~=0
            xd(i,F)=xd(i,F)*X(i,j)^Pi(L-j+1);
            Pol(i,j)=Pi(L-j+1);
        end
    end
end
end
end
end
end
[v,e]=size(xd);
fg(1:M,1)=1;
XD=[fg xd];

```

```

function XD=fod_np(ct,X)
%=====
%Побудова системи умовних рівнянь для повного полінома зада-
%ного степеня від заданої кількості змінних
%=====
%Вхід
%ct-ступінь полінома
%L-кількість аргументів
%M-кількість точок початкового масиву
%X-масив значень вхідних аргументів (MxL)
%-----
%Вихід
%X-масив даних розміру MxN, де N-кількість членів полінома
%-----
%Необхідні підпрограми: regi
%-----
[M L]=size(X);
Pi(1:L)=0;
F=0;
for k=1:ct
    Pi(L)=k-1;
    Pi(1)=0;
    while Pi(1)<k
        Pi=regi(Pi,L,k+1);
        S=sum(Pi);
        while S~k
            Pi=regi(Pi,L,k+1);
            S=sum(Pi);
        end
    end
    F=F+1;
    for i=1:M
        xd(i,F)=1;
    for j=1:L
        if Pi(L-j+1)~=0

```

```

        xd(i,F)=xd(i,F)*X(i,j)^Pi(L-j+1);
    end
end
end
end
end
[v,e]=size(xd);
fg(1:M,1)=1;
XD=[fg xd];

«function [ch1,ch2,chi1,chi2]=ch_new(k,C,i,Pch)
%=====
%Операція схрещування хромосом
%=====
%Вхід
%k-кількість генів у хромосомі
%кс-змінна формування пар
%i-змінна циклу
%С-матриця пар хромосом
%Pch-пул родичів
%Вихід
%ср-пара потомків
%-----
%Вибираємо точки схрещування для кожної пари хромосом
L=unidrnd(k-1,1,1);
    C1=C(1,i);
    C2=C(2,i);
    ch1=Pch(C1,:);
    ch2=Pch(C2,:);
    chi1=ch1;
    chi2=ch2;
    %Перша частина першої і другої хромосом
    chi1(L+1:k)=[];
    chi2(L+1:k)=[];
    %Друга частина першої і другої хромосом
    ch1(1:L)=[];
    ch2(1:L)=[];»[97, с.174-175]
function [X, kg] = fun_perform_Gauss(A)
[n m]=size(A);
spmd
    [s kg]= fun_ Gauss (A);
end
X=zeros(n,1);
Ab=s{1};
As=Ab(1:n,1:n);
bs=Ab(1:n,n+1);
%-----
%Обчислення розв'язків методом зворотного ходу
%-----

```

```

X(n)=bs(n)/As(n,n);
for k=n-1:-1:1
    v=As(k,k+1:n);
    f= X(k+1:n);
    X(k)=(bs(k)-As(k,k+1:n)*X(k+1:n))/As(k,k);
end
end
end

```

```

function [U, kga]=fun_Gauss(A)
[M N]=size(A);
r=0;s=0;
kga = 1;
while r~=1
    s=s+1; % лічильник
    if labindex==1
        [m n]=size(A); % розмір матриці на другій
        %ітерації зменшується в розмірі,
        % склеюється із підматриць, які обчислюються
        % воркерами
        qq=mod(m,numlabs); % залишок від ділення
        for otherLab = 2:numlabs
            % відправка відповідних шарів матриці A
            labSend(qq,otherLab,6);
            [Asend q r]=par_getslice(A,otherLab,numlabs);
            labSend(Asend,otherLab,3);
        end
        [A q r]=par_getslice(A,labindex,numlabs);
        [m n]=size(A);
        % мастер отримав свій блок матриці A
        % і приведення підматриці в майстрі до
        % верхньодіагонального вигляду
        for i=1:m
            if A(i,i)==0
                kga=0;
                error('Матриця A особлива. Система немає розв'язку')
            end
            A(i,:)=A(i,+)/A(i,i);
            %рядок A(i,:) має бути відправленим до всіх воркерів
            for otherLab = 2:numlabs
                labSend(A(i,:),otherLab,1); %рядок
                labSend(i,otherLab,2); %номер рядка
            end
            % отримання еульових елементів під елементом A(i,i)
            for k=i+1:m
                A(k,:)=A(i,)*A(k,i)-A(k,);
            end
        end
    end
    % A -верхньодіагональна матриця , обчислена майстером

```

```

%якщо це перший крок
if s==1
    U=A;
else
    U=[U;zeros(m,N-n) A];
end
% склеювання нової матриці A, де кожна підматриця
% є матрицею, обчислену воркером
A=[];
for otherLab = 2:numlabs
Arecive=labReceive(otherLab,4);
    [b bl]=size(Arecive);
    A=[A;Arecive];
    [b bl]=size(A);
end
if (r==1 )
    U=[U;zeros(1,N-r-1) A];
end
else
A=labReceive(1,3); % підматриця
q=labReceive(1,6);
[m n]=size(A);
r=m;
for i=1:m+q
    Arow=labReceive(1,1); %рядок
    j=labReceive(1,2); %індекс рядка
    for k=1:m
        A(k,:)=Arow*A(k,j)-A(k,:);
    end
end
% фільтування матриці A, залишаючи тільки
%ненульові стовпці і відправка майстру
A=A(:,j+1:n);
labSend(A,1,4);
U=[];
end
end
kga=1;

```

```

function [A q r]=par_getslice(A,labindex,numlabs)
[n m]=size(A); % розмір матриці
q=mod(n,numlabs);% залишок від ділення
if q==0 % якщо ділиться без залишку
    r=n/numlabs;
    fprintf('2)par_getslice без залишку рядки від %g. до
%g.\r',(labindex-1)*r+1, labindex*r);
    A=A((labindex-1)*r+1:labindex*r,:);
else % якщо із залишком
    r=(n-q)/numlabs;

```

```

        if labindex==1
            A=A(1:r+q,:);
            fprintf('2)par_getslice 1 воркер із залишком рядки від 1
до %g.\r',r+q);
        else
            fprintf('2)par_getslice воркер із залишком рядки від %g.
до %g.\r',(labindex-1)*r+1+q, labindex*r+q);
            A=A((labindex-1)*r+1+q:labindex*r+q,:);
        end
    end
end

```

```

«function [a,y,cn]=fun_parametr(XD,Y,ch,Ih,zm)
%=====
%Обчислення параметрів моделі (розв'язок нормальних рівнянь)
%=====
%Параметри програми
%-----
%Вхід
%XD-матриця функцій при коефіцієнтах полінома
%Y-вектор виходу об'єкта
%ch-матриця хромосом у пулі родичів
%Gh-матриця "нульових" генів хромосому пулі родичів
%Ih-індекси хромосоми, яка забезпечує мінімальне значення
% критерію відбору
%zm-кількість лінійок матриці Y
%-----
%Вихід
%a-коефіцієнти моделі
%y-вихід моделі
%cn-"найкраща" хромосома
%-----
cn=ch(Ih,:);
k=length(cn);
t=1;
for i=1:k
    if cn(i)==0;
        gn(t)=i;
        t=t+1;
    end
end
F=XD;
if t~=1
    F(:,gn)=[];
end
if zm==1
    A=[F'*F F'*Y'];
else
    A=[F'*F F'*Y];
end [97, с.176-177]

```



```

[a, ier]= fun_perform_Gauss(A);
  if ier==0
    error('Немає розв'язку')
  end
  y=F*a;
  y_F=y;
  save parameters y y_F F a;
end»

```

```

function D=regi(D,n,s)
%=====
%Додавання одиниці до числа з довільною основою
%=====
%Вхідні дані
%D-кількість (одновимірний масив)
%n-розмір вектора D
%s-основа числа D
%-----
%Вихід
%D-вектор
%-----
k=n;
for i=k:-1:1
  if D(i)<s-1
    D(i)=D(i)+1;
    break
  else
    D(i)=0;
  end
end
end

```

## ДОДАТОК Є

## Програма обчислення зміни параметрів технічного стану двоступеневого ВЦН

```

%=====
% Програма обчислення зміни параметрів технічного стану ВЦН 650-
21-2
%=====
% Дані необхідні для обчислення зміни параметрів ВЦН 650-21-2
load parameters_March;
load pohidni_M;
load Q_M;
load X1
load X2
load X3
%-----
%Розрахунок
QQ_M=y_M*(max(Q_M)-min(Q_M))+min(Q_M);
save QQ_M
%Продуктивність ВЦН за поточний місяць
%-----
N=length(Q_M);
figure
K=1:N;
plot(K,Q_M,'ro-',K,QQ_M,'b+-')
grid on
%title('Зміна об'ємної продуктивності ВЦН 650-21-2 до
капітального ремонту')
xlabel('Кількість точок')
ylabel('Продуктивність нагнітача, м^3/с')
legend('Розрахунок','Експеримент')
%-----
F_M=[dXdX1_M dXdX2_M dXdKpr_M];
C_M=(F_M'*F_M)^(-1);
dQ_M=Q_M-QQ_M;
dX=C_M*F_M'*dQ_M
X=[X1; X2; X3];
deltaX=(abs(dX)./X).*100;
save deltaX
save dX

```

## ДОДАТОК Ж

### Програма експертної системи контролю параметрів двоступеневого ВЦН

```

%=====
% Програма експертної оцінки технічного стану двоступеневого ВЦН
%=====
% Дані необхідні для обчислення параметрів технічного стану ВЦН
load deltaX;
load dX;
%Вхідні змінні
a=newfis('Estimation')
%Перша вхідна лінгвістична змінна
a.input(1).name='deltaX1';
a.input(1).range=[0 10];
a.input(1).mf(1).name='prf';
a.input(1).mf(1).type='trapmf';
a.input(1).mf(1).params=[-3.57 -0.374 2 4];
a.input(1).mf(2).name='nrm';
a.input(1).mf(2).type='trapmf';
a.input(1).mf(2).params=[2 4 6 8];
a.input(1).mf(3).name='n_iter';
a.input(1).mf(3).type='trapmf';
a.input(1).mf(3).params=[6 8 12 14];
figure
plotmf(a,'input',1)
grid on
%Друга вхідна лінгвістична змінна
a.input(2).name='deltaX2';
a.input(2).range=[0 10];
a.input(2).mf(1).name='prf';
a.input(2).mf(1).type='trapmf';
a.input(2).mf(1).params=[-3.57 -0.374 1 3];
a.input(2).mf(2).name='nrm';
a.input(2).mf(2).type='trapmf';
a.input(2).mf(2).params=[2 4 6 8];
a.input(2).mf(3).name='n_iter';
a.input(2).mf(3).type='trapmf';
a.input(2).mf(3).params=[7 9 12 14];
%Третя вхідна лінгвістична змінна
a.input(3).name='deltaX3';
a.input(3).range=[0 10];
a.input(3).mf(1).name='prf';
a.input(3).mf(1).type='trapmf';
a.input(3).mf(1).params=[-3.57 -0.374 1 3];
a.input(3).mf(2).name='nrm';
a.input(3).mf(2).type='trapmf';
a.input(3).mf(2).params=[2 4 6 8];
a.input(3).mf(3).name='n_iter';

```

```

a.input(3).mf(3).type='trapmf';
a.input(3).mf(3).params=[7 9 12 14];
%-----

```

```

%Вихідні змінні
a.output(1).name='d';
a.output(1).range=[0 1];
a.output(1).mf(1).name='fine';
a.output(1).mf(1).type='trapmf';
a.output(1).mf(1).params=[-0.36 -0.04 0.1 0.3];
a.output(1).mf(2).name='perm';
a.output(1).mf(2).type='trapmf';
a.output(1).mf(2).params=[0.2 0.4 0.6 0.8];
a.output(1).mf(3).name='ntm';
a.output(1).mf(3).type='trapmf';
a.output(1).mf(3).params=[0.7 0.9 1.04 1.36];
figure
plotmf(a,'output',1)
grid on
%-----

```

```

%Інференціювання
a.rule(1).antecedent=[1 1 1];
a.rule(1).consequent=[1];
a.rule(1).weight=1;
a.rule(1).connection=1;
a.rule(2).antecedent=[1 1 2];
a.rule(2).consequent=[2];
a.rule(2).weight=1;
a.rule(2).connection=1;
a.rule(3).antecedent=[1 1 3];
a.rule(3).consequent=[3];
a.rule(3).weight=1;
a.rule(3).connection=1;
a.rule(4).antecedent=[1 2 1];
a.rule(4).consequent=[2];
a.rule(4).weight=1;
a.rule(4).connection=1;
a.rule(5).antecedent=[1 3 1];
a.rule(5).consequent=[3];
a.rule(5).weight=1;
a.rule(5).connection=1;
a.rule(6).antecedent=[2 1 1];
a.rule(6).consequent=[2];
a.rule(6).weight=1;
a.rule(6).connection=1;
a.rule(7).antecedent=[3 1 1];
a.rule(7).consequent=[3];
a.rule(7).weight=1;
a.rule(7).connection=1;
a.rule(8).antecedent=[2 2 2];

```

```
a.rule(8).consequent=[2];
a.rule(8).weight=1;
a.rule(8).connection=1;
a.rule(9).antecedent=[2 2 3];
a.rule(9).consequent=[3];
a.rule(9).weight=1;
a.rule(9).connection=1;
a.rule(10).antecedent=[2 2 1];
a.rule(10).consequent=[2];
a.rule(10).weight=1;
a.rule(10).connection=1;
a.rule(11).antecedent=[2 1 2];
a.rule(11).consequent=[2];
a.rule(11).weight=1;
a.rule(11).connection=1;
a.rule(12).antecedent=[2 3 2];
a.rule(12).consequent=[3];
a.rule(12).weight=1;
a.rule(12).connection=1;
a.rule(13).antecedent=[1 2 2];
a.rule(13).consequent=[2];
a.rule(13).weight=1;
a.rule(13).connection=1;
a.rule(14).antecedent=[3 2 2];
a.rule(14).consequent=[3];
a.rule(14).weight=1;
a.rule(14).connection=1;
a.rule(15).antecedent=[3 3 3];
a.rule(15).consequent=[3];
a.rule(15).weight=1;
a.rule(15).connection=1;
a.rule(16).antecedent=[2 3 3];
a.rule(16).consequent=[3];
a.rule(16).weight=1;
a.rule(16).connection=1;
a.rule(17).antecedent=[1 3 3];
a.rule(17).consequent=[3];
a.rule(17).weight=1;
a.rule(17).connection=1;
a.rule(18).antecedent=[3 1 3];
a.rule(18).consequent=[3];
a.rule(18).weight=1;
a.rule(18).connection=1;
a.rule(19).antecedent=[3 2 3];
a.rule(19).consequent=[3];
a.rule(19).weight=1;
a.rule(19).connection=1;
a.rule(20).antecedent=[3 3 1];
a.rule(20).consequent=[3];
a.rule(20).weight=1;
```

```

a.rule(20).connection=1;
a.rule(21).antecedent=[3 3 2];
a.rule(21).consequent=[3];
a.rule(21).weight=1;
a.rule(21).connection=1;
a.rule(22).antecedent=[1 2 3];
a.rule(22).consequent=[3];
a.rule(22).weight=1;
a.rule(22).connection=1;
a.rule(23).antecedent=[1 3 2];
a.rule(23).consequent=[3];
a.rule(23).weight=1;
a.rule(23).connection=1;
a.rule(24).antecedent=[2 1 3];
a.rule(24).consequent=[3];
a.rule(24).weight=1;
a.rule(24).connection=1;
a.rule(25).antecedent=[2 3 1];
a.rule(25).consequent=[3];
a.rule(25).weight=1;
a.rule(25).connection=1;
a.rule(26).antecedent=[3 1 2];
a.rule(26).consequent=[3];
a.rule(26).weight=1;
a.rule(26).connection=1;
a.rule(27).antecedent=[3 2 1];
a.rule(27).consequent=[3];
a.rule(27).weight=1;
a.rule(27).connection=1;
%Встановлення методу дефаззифікації Centroid:
a=setfis(a,'DefuzzMethod','centroid');
%Нечіткий логічний висновок:
d=evalfis(deltaX, a);
figure
gensurf(a)
figure
plotfis(a)
fprintf('ВИСНОВОК:\r')
if and(d>0,d<=0.3)
    fprintf('    Стан    проточної    частини    нагнітача    -
відмінний\r');
    elseif and(d>0.3,d<=0.7)
        fprintf('    Стан    проточної    частини    нагнітача    -
допустимий\r');
    elseif d>0.7
        fprintf('    Необхідно    вжити    заходів\r');
end

```

### ДОДАТОК 3

#### Програма налаштування вагових коефіцієнтів експертної системи контролю параметрів двоступеневого ВЦН

```

%=====
%Налаштування вагових коефіцієнтів
%=====
%Формування матриці даних КС "Богородчани"
load tr_data;
load ch_data;
fis=readfis('estimation.fis');
num_rule=length(fis.rule);
out_tr=evalfis(tr_data,fis);
out_ch=evalfis(ch_data,fis);
vlb_w(1:num_rule)=0;
w0(1:num_rule)=0;
vub_w(1:num_rule)=1;
vlb=vlb_w;
x0=w0;
vub=vub_w;
options=[];
options=optimset('Display','iter');
options.DiffMinChange=0.0001;
options.DiffMaxChange=0.2;
options.LargeScale='off';
options.MaxIter=25;
[xopt,delta]=fmincon(@ob_fun_mpg,x0,[],[],[],...
    [],vlb,vub,[],options,fis,[],...
    []);
fis=change_fis(xopt,fis);
out_ch=evalfis(ch_data(:,1:2),fis);
rmg_ch=norm(out_ch-ch_data(:,3))/sqrt(length(ch_data));
writefis(fis,'mpg_estimation_trained.fis');

```

#### Файл-програми

```

function delta=ob_fun_mpg(x,fis,out_tr,out_ch)
fis=change_fis_mpg(x,fis);
%out_tr=evalfis(inp,fis);
delta=sum((out_tr-out_ch).^2)/sqrt(length(out_ch));

```

```

function fis_new=change_fis_mpg(x,fis_old);
fis_new=fis_old;
%fis_new.input(1).mf(1).params(1)=1000*x(1);
%fis_new.input(1).mf(2).params(1)=1000*x(2);
%fis_new.input(2).mf(1).params(1)=10*x(3);

```

```
%fis_new.input(2).mf(2).params(1)=10*x(4);
%fis_new.output(1).mf(1).params(1)=10*x(5);
%fis_new.output(1).mf(2).params(1)=10*x(6);
%fis_new.output(1).mf(2).params(1)=10*x(7);

%fis_new.output(1).mf(2).params(1)=10*x(6);
%fis_new.output(1).mf(2).params(1)=10*x(6);
%fis_new.output(1).mf(2).params(1)=10*x(7);
%fis_new.output(1).mf(2).params(2)=10*x(8);
fis_new.rule(1).weight=x(1);
fis_new.rule(2).weight=x(2);
fis_new.rule(3).weight=x(3);
fis_new.rule(4).weight=x(4);
fis_new.rule(5).weight=x(5);
fis_new.rule(6).weight=x(6);
fis_new.rule(7).weight=x(7);
fis_new.rule(8).weight=x(8);
fis_new.rule(9).weight=x(9);
fis_new.rule(10).weight=x(10);
fis_new.rule(11).weight=x(11);
fis_new.rule(12).weight=x(12);
fis_new.rule(13).weight=x(13);
fis_new.rule(14).weight=x(14);
fis_new.rule(15).weight=x(15);
fis_new.rule(16).weight=x(16);
fis_new.rule(17).weight=x(17);
fis_new.rule(18).weight=x(18);
fis_new.rule(19).weight=x(19);
fis_new.rule(20).weight=x(20);
fis_new.rule(21).weight=x(21);
fis_new.rule(22).weight=x(22);
fis_new.rule(23).weight=x(23);
fis_new.rule(24).weight=x(24);
fis_new.rule(25).weight=x(25);
fis_new.rule(26).weight=x(26);
fis_new.rule(27).weight=x(27);
```



## ДОДАТОК І

## Текст програми-інтегратора

```

unit Unit1;

interface

uses
  Winapi.Windows, Winapi.Messages, System.SysUtils, System.Variants,
  System.Classes, Vcl.Graphics,
  Vcl.Controls, Vcl.Forms, Vcl.Dialogs,
  Vcl.StdCtrls, System.Win.ComObj,
  VclTee.TeeGDIPlus, VCLTee.Series, VCLTee.TeEngine, Vcl.ExtCtrls,
  VCLTee.TeeProcs, VCLTee.Chart, Unit2, Unit3, Unit4;

type
  TMain = class(TForm)
    Label1: TLabel;
    Button1: TButton;
    Button2: TButton;
    Button3: TButton;
    Button4: TButton;
    Label2: TLabel;
    Label3: TLabel;
    Label4: TLabel;
    Label5: TLabel;
    Edit1: TEdit;
    Chart1: TChart;
    Series1: TPointSeries;
    Series2: TLineSeries;
    Label6: TLabel;
    procedure Button1Click(Sender: TObject);
    procedure FormCreate(Sender: TObject);
    procedure Button2Click(Sender: TObject);
    procedure Button3Click(Sender: TObject);
    procedure Button4Click(Sender: TObject);

  private
    { Private declarations }
  public
    { Public declarations }
  end;

var
  Main: TMain;
  V : Variant;

x0,x0i,x1,x1i,x2,x2i,x3,x3i,x4,x4i,m,mi,kt,kti,n,ni,k1,k1_i,Q_a,Q_ai,Q
l_a,Ql_ai,ty,ty_i,Y,Yi,y1,y1i,d,di,k2,k2_i,Q_m,Q_mi, QQ_m,
QQ_mi,deltaX, deltaX_i : OLEVariant;

```

```

    n1,n2,n3: Integer;
implementation

{$R *.dfm}

procedure TMain.Button1Click(Sender: TObject);
var

i: Integer;
begin
V:=CreateOleObject('Matlab.Application');
V.Execute('KS3_ga_August');
x0:=VarArrayCreate([1,1],varDouble);
x0i:=VarArrayCreate([1,1],varDouble);
V.GetFullMatrix('X0','base',VarArrayRef(x0),VarArrayRef(x0i));
x1:=VarArrayCreate([1,1],varDouble);
x1i:=VarArrayCreate([1,1],varDouble);
V.GetFullMatrix('X1','base',VarArrayRef(x1),VarArrayRef(x1i));
x2:=VarArrayCreate([1,1],varDouble);
x2i:=VarArrayCreate([1,1],varDouble);
V.GetFullMatrix('X2','base',VarArrayRef(x2),VarArrayRef(x2i));
x3:=VarArrayCreate([1,1],varDouble);
x3i:=VarArrayCreate([1,1],varDouble);
V.GetFullMatrix('X3','base',VarArrayRef(x3),VarArrayRef(x3i));
x4:=VarArrayCreate([1,1],varDouble);
x4i:=VarArrayCreate([1,1],varDouble);
V.GetFullMatrix('X4','base',VarArrayRef(x4),VarArrayRef(x4i));
m:=VarArrayCreate([1,1],varDouble);
mi:=VarArrayCreate([1,1],varDouble);
V.GetFullMatrix('mu','base',VarArrayRef(m),VarArrayRef(mi));
kt:=VarArrayCreate([1,1],varDouble);
kti:=VarArrayCreate([1,1],varDouble);
V.GetFullMatrix('kt','base',VarArrayRef(kt),VarArrayRef(kti));
n:=VarArrayCreate([1,1],varDouble);
ni:=VarArrayCreate([1,1],varDouble);
V.GetFullMatrix('N','base',VarArrayRef(n),VarArrayRef(ni));
n1:=n[1];
k1:=VarArrayCreate([1,n1],varDouble);
k1_i:=VarArrayCreate([1,n1],varDouble);
V.GetFullMatrix('K','base',VarArrayRef(k1),VarArrayRef(k1_i));
Q_a:=VarArrayCreate([1,n1],varDouble);
Q_ai:=VarArrayCreate([1,n1],varDouble);
V.GetFullMatrix('Q_A','base',VarArrayRef(Q_a),VarArrayRef(Q_ai));
Q1_a:=VarArrayCreate([1,n1],varDouble);
Q1_ai:=VarArrayCreate([1,n1],varDouble);
V.GetFullMatrix('Q1_A','base',VarArrayRef(Q1_a),VarArrayRef(Q1_ai));

Identify.Edit1.Text:=FloatToStrF(x0[1],ffFixed,10,4);
Identify.Edit2.Text:=FloatToStrF(x1[1],ffFixed,10,4);
Identify.Edit3.Text:=FloatToStrF(x2[1],ffFixed,10,4);

```

```

Identify.Edit4.Text:=FloatToStrF(x3[1],ffFixed,10,4);
Identify.Edit5.Text:=FloatToStrF(x4[1],ffFixed,10,4);
Identify.Edit6.Text:=FloatToStrF(m[1],ffFixed,10,4);
Identify.Edit7.Text:=FloatToStrF(kt[1],ffFixed,10,4);
Identify.chart1.leftaxis.title.caption:='Продуктивність
нагнітача,м3/с';
Identify.chart1.bottomaxis.title.caption:='Кількість точок';
for i := 1 to n1 do begin
Identify.Series2.AddXY(k1[i],Q_a[i]);
Identify.Series1.AddXY(k1[i],Q1_a[i]);
end;

V.Execute('EmpiricModel_KS3_March');
n:=VarArrayCreate([1,1],varDouble);
ni:=VarArrayCreate([1,1],varDouble);
V.GetFullMatrix('M','base',VarArrayRef(n),VarArrayRef(ni));
n2:=n[1];
ty:=VarArrayCreate([1,n2],varDouble);
ty_i:=VarArrayCreate([1,n2],varDouble);
V.GetFullMatrix('ty','base',VarArrayRef(ty),VarArrayRef(ty_i));
Y:=VarArrayCreate([1,n2],varDouble);
Yi:=VarArrayCreate([1,n2],varDouble);
V.GetFullMatrix('Y','base',VarArrayRef(Y),VarArrayRef(Yi));
y1:=VarArrayCreate([1,n2],varDouble);
y1i:=VarArrayCreate([1,n2],varDouble);
V.GetFullMatrix('y','base',VarArrayRef(y1),VarArrayRef(y1i));
Model.chart1.leftaxis.title.caption:='Продуктивність          нагнітача,
безрозмірні одиниці';
Model.chart1.bottomaxis.title.caption:='Кількість точок';
for i := 1 to n2 do begin
Model.Series2.AddXY(ty[i],y1[i]);
Model.Series1.AddXY(ty[i],Y[i]);
end;
V.Execute('Estimation_KS39');
d:=VarArrayCreate([1,1],varDouble);
di:=VarArrayCreate([1,1],varDouble);
V.GetFullMatrix('d','base',VarArrayRef(d),VarArrayRef(di));
n:=VarArrayCreate([1,1],varDouble);
ni:=VarArrayCreate([1,1],varDouble);
V.GetFullMatrix('N','base',VarArrayRef(n),VarArrayRef(ni));
n3:=n[1];
k1:=VarArrayCreate([1,n3],varDouble);
k1_i:=VarArrayCreate([1,n3],varDouble);
V.GetFullMatrix('K','base',VarArrayRef(k1),VarArrayRef(k1_i));
Q_m:=VarArrayCreate([1,n3],varDouble);
Q_mi:=VarArrayCreate([1,n3],varDouble);
V.GetFullMatrix('Q_M','base',VarArrayRef(Q_m),VarArrayRef(Q_mi));
QQ_m:=VarArrayCreate([1,n3],varDouble);
QQ_mi:=VarArrayCreate([1,n3],varDouble);
V.GetFullMatrix('QQ_M','base',VarArrayRef(QQ_m),VarArrayRef(QQ_mi));

```

```

deltaX:=VarArrayCreate([1,3],varDouble);
deltaX_i:=VarArrayCreate([1,3],varDouble);
V.GetFullMatrix('deltaX','base',VarArrayRef(deltaX),VarArrayRef(deltaX
_i));

V.Quit;

Edit1.Text:=FloatToStrF(d[1],ffFixed,10,4);
Calculation.Edit1.Text:=FloatToStrF(deltaX[1],ffFixed,10,4);
Calculation.Edit2.Text:=FloatToStrF(deltaX[2],ffFixed,10,4);
Calculation.Edit3.Text:=FloatToStrF(deltaX[3],ffFixed,10,4);
if (d[1]>0) and (d[1]<=0.3) then Main.Label6.Caption:='Технічний стан
проточної частини нагнітача - відмінний'
else if (d[1]>0.3) and (d[1]<=0.7) then
Main.Label6.Caption:='Технічний стан нагнітача проточної частини -
допустимий'
else Main.Label6.Caption:='Необхідно вжити заходів';

chart1.leftaxis.title.caption:='Продуктивність нагнітача, м3/с';
chart1.bottomaxis.title.caption:='Кількість точок';
for i := 1 to n3 do begin
Series2.AddXY(k1[i],Q_m[i]);
Series1.AddXY(k1[i],QQ_m[i]);
end;

end;

procedure TMain.Button2Click(Sender: TObject);
begin
Identify.Show;
Main.Hide;
end;

procedure TMain.Button3Click(Sender: TObject);
begin
Model.Show;
Main.Hide;
end;

procedure TMain.Button4Click(Sender: TObject);
begin
Calculation.Show;
Main.Hide;
end;

procedure TMain.FormCreate(Sender: TObject);
begin
Series1.Clear;
Series2.Clear;
end;

```

end.

```

unit Unit2;

interface

uses
    Winapi.Windows,           Winapi.Messages,           System.SysUtils,
    System.Variants, System.Classes, Vcl.Graphics,
    Vcl.Controls,           Vcl.Forms,           Vcl.Dialogs,           Vcl.StdCtrls,
    VclTee.TeeGDIPlus,
    VCLTee.Series, VCLTee.TeEngine, Vcl.ExtCtrls, VCLTee.TeeProcs,
    VCLTee.Chart;

type
    TIdentify = class(TForm)
        Label1: TLabel;
        Label2: TLabel;
        Label3: TLabel;
        Label4: TLabel;
        Label5: TLabel;
        Label6: TLabel;
        Label7: TLabel;
        Label8: TLabel;
        Label9: TLabel;
        Label10: TLabel;
        Edit1: TEdit;
        Edit2: TEdit;
        Edit3: TEdit;
        Edit4: TEdit;
        Edit5: TEdit;
        Edit6: TEdit;
        Edit7: TEdit;
        Chart1: TChart;
        Series1: TPointSeries;
        Series2: TLineSeries;
        procedure FormClose(Sender: TObject; var Action:
TCloseAction);
    private
        { Private declarations }
    public
        { Public declarations }
    end;

var
    Identify: TIdentify;

implementation

```

```

uses Unit1;

{$R *.dfm}

procedure TIdentify.FormClose(Sender: TObject; var Action:
TCloseAction);
begin
Main.Show;

end;
end.

unit Unit3;

interface

uses
Winapi.Windows, Winapi.Messages, System.SysUtils,
System.Variants, System.Classes, Vcl.Graphics,
Vcl.Controls, Vcl.Forms, Vcl.Dialogs, Vcl.StdCtrls,
VclTee.TeeGDIPlus,
VCLTee.Series, VCLTee.TeEngine, Vcl.ExtCtrls, VCLTee.TeeProcs,
VCLTee.Chart;

type
TModel = class(TForm)
Label1: TLabel;
Chart1: TChart;
Series1: TPointSeries;
Series2: TLineSeries;
procedure FormClose(Sender: TObject; var Action:
TCloseAction);
private
{ Private declarations }
public
{ Public declarations }
end;

var
Model: TModel;

implementation
uses Unit1;
{$R *.dfm}

procedure TModel.FormClose(Sender: TObject; var Action:
TCloseAction);
begin
Main.Show;
end;

```

```

end.

unit Unit4;

interface

uses
    Winapi.Windows,           Winapi.Messages,           System.SysUtils,
    System.Variants, System.Classes, Vcl.Graphics,
    Vcl.Controls, Vcl.Forms, Vcl.Dialogs, Vcl.StdCtrls;

type
    TCalculation = class(TForm)
        Label1: TLabel;
        Label2: TLabel;
        Label3: TLabel;
        Label4: TLabel;
        Label5: TLabel;
        Label6: TLabel;
        Label7: TLabel;
        Edit1: TEdit;
        Edit2: TEdit;
        Edit3: TEdit;
        procedure FormClose(Sender: TObject; var Action:
TCloseAction);
    private
        { Private declarations }
    public
        { Public declarations }
    end;

var
    Calculation: TCalculation;

implementation
uses Unit1;
{$R *.dfm}

    procedure TCalculation.FormClose(Sender: TObject; var Action:
TCloseAction);
    begin
        Main.Show;
    end;

end.

```

**"ЗАТВЕРДЖУЮ"**

Головний інженер

Філії УМГ «ПРИКАРПАТТРАНСГАЗ»

**Костів В.В.**

«12» червня 2017 р

### АКТ ВПРОВАДЖЕННЯ

Комісія, у складі начальника відділу автоматизації філії Управління магістральних газопроводів "ПРИКАРПАТТРАНСГАЗ" **Крицуна Ярослава Володимировича** та представників Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу: завідувача кафедри комп'ютерних систем і мереж, д-ра техн. наук, проф. **Горбійчука Михайла Івановича** та здобувача **Гарасимів Віри Михайлівни** склали цей акт у тому, що «12» червня 2017 р. прийняті до впровадження наступні результати дисертаційної роботи Гарасимів В. М. «Удосконалення методів ідентифікації технічних станів окремих вузлів ГПА», а саме: програмне забезпечення системи ідентифікації технічного стану проточної частини ВЦН. Програмні продукти інтегровані у структуру штатної системи керування компресорними станціями. Очікуваний економічний ефект від впровадження за рахунок переходу від проведення планового ремонту ГПА до ремонту за його фактичним технічним станом складе 104 тис. грн. за рік.

Від УМГ "ПРИКАРПАТТРАНСГАЗ"

Начальник ВА

/ Крицун Я. В. /

Від Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу

Завідувач кафедри КСМ,  
д-р техн. наук, проф.

/ Горбійчук М. І. /

Здобувач

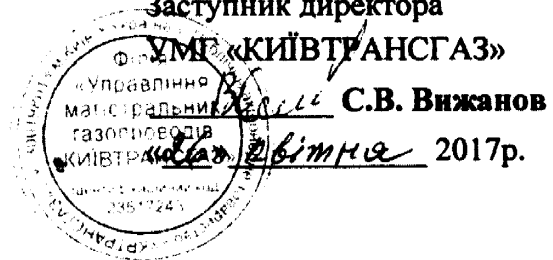
/ Гарасимів В. М. /



"ЗАТВЕРДЖУЮ"

Заступник директора

УМ «КИЇВТРАНСГАЗ»



С.В. Вижанов

19 квітня 2017р.

### АКТ ВПРОВАДЖЕННЯ

Комісія у складі представників філії управління магістральних газопроводів "КИЇВТРАНСГАЗ" начальника відділу автоматизації Андрющенко Олександра Володимировича, начальника відділу газовимірювань і метрології, канд. техн. наук Скріпки Олександра Анатолійовича та представників Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу - завідувача кафедри комп'ютерних систем і мереж, д-ра техн. наук, проф. Горбійчука Михайла Івановича та аспіранта кафедри КСМ Медведчук Віри Михайлівни склали цей акт у тому, що 19 квітня 2017 р. прийняті до впровадження наступні результати дисертаційної роботи Медведчук В. М. «Удосконалення методів ідентифікації технічних станів окремих вузлів ГПА», а саме: програмне забезпечення системи ідентифікації технічного стану проточної частини ВЦН. Програмні продукти інтегровані у структуру штатної системи керування компресорними станціями. Очікуваний економічний ефект від впровадження за рахунок переходу від проведення планового ремонту ГПА до ремонту за його фактичним технічним станом складе 107 тис. грн. за рік.

Від філії управління магістральних газопроводів "Київтрансгаз"

Начальник відділу автоматизації  
 \_\_\_\_\_ / Андрющенко О.В. /

Начальник відділу ГВ і М,  
 канд. техн. наук  
 \_\_\_\_\_ /Скріпка О.А./

Від Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу

Завідувач кафедри КСМ,  
 д-р техн. наук, проф.  
 \_\_\_\_\_ / Горбійчук М. І. /

Пошукувач кафедри КСМ  
 \_\_\_\_\_ / Медведчук В. М. /

**ЗАТВЕРДЖУЮ**

Ректор Івано-Франківського  
національного технічного університету  
нафти і газу  
д-р техн. наук, проф.

Є. І. Крижанівський  
«17» травня 2017 р.

**АКТ**

Про використання у навчальному процесі наукових результатів дисертаційної роботи Медведчук Віри Михайлівни «Удосконалення методів ідентифікації технічних станів окремих вузлів ГПА», представленої на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук.

Ми, що нижче підписалися, склали даний акт у тому, що алгоритмічне і програмне забезпечення комп'ютерної системи ідентифікації технічного стану проточної частини відцентрового нагнітача природного газу впроваджено в навчальний процес кафедр комп'ютерних систем і мереж у дисципліні «Комп'ютерні системи штучного інтелекту» та математичних методів в інженерії у дисципліні «Моделювання об'єктів нафтогазового комплексу» для студентів спеціальності 123 – «Комп'ютерна інженерія».

**Розділи робочої програми, де використані наукові результати дисертаційної роботи Медведчук В.М.**

Дисципліна – *Комп'ютерні системи штучного інтелекту.*

Шифр спеціальності 123 – «Комп'ютерна інженерія».

№ п.п.	Тема лабораторної роботи	Впровадження у навчальний процес	Обсяг, год.	Додаткова література
1.	Нейрокомп'ютинг: нечітка математика в нейро-мережному логічному базисі. Середовище GenLab, правила і особливості роботи. Генетичні алгоритми: розв'язок оптимізаційних задач за допомогою генетичних алгоритмів	Метод побудови емпіричної моделі ВІД оптимальної складності з використанням генетичних алгоритмів	2	[1. 2]

Дисципліна – *Моделювання об'єктів нафтогазового комплексу.*

Шифр спеціальності 123 – «Комп'ютерна інженерія».

№ п.п.	Тема лекції	Впровадження у навчальний процес	Обсяг, год.	Додаткова література
1.	Моделі на основі рівнянь матфізики. Теплопровідність, дифузія шкідливих речовин, коливання. Рівняння руху рідини в трубопроводі. Рівняння Лапласа	Математична модель технічного стану двоступеневого нагнітача природного газу	2	[3. 4. 5]

### Додаткова література

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

2. Горбійчук М. І. Аналіз паралельного алгоритму синтезу емпіричних моделей на принципах генетических алгоритмів / М. І. Горбійчук, В. М. Медведчук, А. Н. Лазорив // Проблемы управления и информатики. – 2016. - №1. – С. 112-131.

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

3. Горбійчук М. І. Метод параметричної ідентифікації технічного стану двоступеневого відцентрового нагнітача природного газу / М. І. Горбійчук, В. М. Медведчук // Нафтогазова енергетика. – 2015. – №1. – С. 78-85.

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

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

Проректор з науково-педагогічної роботи,  
д-р техн. наук, проф.



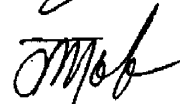
*О. М. Мандрюк*

Директор інституту інформаційних  
технологій, канд. техн. наук, доц.



*І. І. Чигур*

Завідувач кафедри комп'ютерних систем і мереж,  
д-р техн. наук, проф.



*М. І. Горбійчук*

Завідувач кафедри математичних методів в інженерії,  
д-р техн. наук, проф.



*А. П. Олійник*