

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

Кваліфікаційна наукова
праця на правах рукопису

ФЕШАНИЧ ЛІДІЯ ІГОРІВНА

УДК 681.5.015:622.691.4

ДИСЕРТАЦІЯ

**Удосконалення інформаційного забезпечення системи антипомпажного
захисту відцентрового нагнітача газоперекачувального агрегату на засадах
штучного інтелекту**

05.13.07 – автоматизація процесів керування

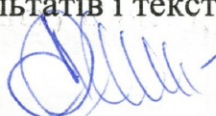
(шифр і назва спеціальності)

15 – автоматизація та приладобудування

(галузь знань)

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

 / Л. І. Фешанич/

Ідентичність всіх примірників дисертації

Засвідчую

Вений секретар спеціалізованої

вченої ради

Підпис О. Б. Барни засвідчую:

Вчений секретар

Науковий керівник - Семенов Георгій Никифорович, доктор технічних наук,
професор



Івано-Франківськ – 2018

АНОТАЦІЯ

Фешанич Л. І. Удосконалення інформаційного забезпечення системи антипомпажного захисту відцентрового нагнітача газоперекачувального агрегату на засадах 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» (151 – автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології). – Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу МОН України, Івано-Франківськ, 2018.

У дисертаційному дослідженні вирішено актуальне науково-практичне завдання, що полягає в удосконаленні динамічного методу автоматичного антипомпажного захисту системи “відцентровий нагнітач газоперекачувального агрегату – трубопровід ” дотискувальної компресорної станції підземного сховища газу на основі раннього виявлення відхилень технологічного процесу компримування газу від норми, що досягається шляхом використання інформаційної технології злиття даних.

Збільшення рівня автоматизації газотранспортної системи, зокрема компресорних станцій, має супроводжуватися підвищенням швидкодії і надійності не тільки автоматичного керування, але й автоматичного антипомпажного захисту газоперекачувальних агрегатів. Відомі способи діагностування стану відцентрових нагнітачів газоперекачувальних агрегатів нерозривно пов'язані з опрацюванням в реальному часі великої кількості контрольованих параметрів. Оскільки обсяг даних про фактичний технічний стан газоперекачувальних агрегатів є досить значним і не дозволяє проаналізувати усю доступну інформацію людині-оператору самостійно, доцільно застосовувати сучасні методи, зокрема методи штучного інтелекту.

Виконано огляд стану проблеми автоматичного антипомпажного захисту відцентрових нагнітачів газоперекачувальних агрегатів дотискувальних

компресорних станції підземних сховищ газу. На основі аналізу основних переваг і недоліків існуючих методів, встановлено, що ефективність існуючих систем автоматичного антипомпажного захисту не в повній мірі відповідає вимогам технологічного процесу, виявлено тенденції їхнього розвитку і удосконалення. Зроблено висновок, що найбільш ефективними методами автоматичного антипомпажного захисту системи “відцентровий нагнітач газоперекачувального агрегату - трубопровід” є методи обчислювального інтелекту, зокрема інформаційна технологія Data Fusion (злиття даних) адаптована до умов експлуатації на дотискувальних компресорних станція підземних сховищ газу.

З позиції автоматизації процесів керування задачу злиття даних в системі автоматичного керування газоперекачувальним агрегатом з газотурбінним приводом слід розглядати як спосіб підвищення ефективності взаємозв'язку між об'єктом керування і автоматичними керувальними пристроями, що дозволяє поєднати переваги стохастичних властивостей окремих контрольованих параметрів з обчислювальними можливостями мікропроцесорної техніки.

Розроблено описову фізичну модель взаємодії механічних, теплових і газодинамічних - процесів у системі відцентрового нагнітача газоперекачувального агрегату з газотурбінним приводом, що дозволило визначити напрями подальших досліджень щодо удосконалення методу шляхом злиття (об'єднання) інформації про спостережуваний випадковий процес та використання нових методів оброблення інформації.

Проведено аналіз зв'язків математичної моделі процесу компримування газу газоперекачувальним агрегатом з газотурбінним приводом, що дало змогу сформулювати алгоритм функціонування об'єкта керування з урахуванням обмежень окремих компонентів векторів стану, керувальних дій і зовнішніх впливів, визначити матрицю функції передачі, модель типу Multi Input - Multi Output відцентрового нагнітача газоперекачувального агрегату як

багатовимірний об'єкт антипомпажного захисту та методику визначення функції передачі відцентрового нагнітача за результатами спостережень.

Сформовано підхід до вирішення задачі синтезу спостерігача станів відцентрового нагнітача газоперекачувального агрегату за умов поточної невизначеності, що дало змогу сформулювати критерій у вигляді математичного формулювання задачі досліджень, синтезувати алгоритмічну структуру системи автоматичного антипомпажного захисту відцентрового нагнітача газоперекачувального агрегату як багатовимірним об'єктом із спостерігачем його станів у вигляді моделі у змінних стану.

Розроблено узагальнену функціональну структурну систему антипомпажного захисту відцентрового нагнітача газоперекачувального агрегату на засадах нейро-нечіткої мережі, що дозволяє покращити точність діагностування їхнього технічного стану, підвищити ефективність та оперативність операторного керування газоперекачувальних агрегатів за рахунок використання сучасних технічних засобів контролю і керування.

Проведено аналіз статистичних характеристик флуктуацій параметрів, що характеризують явище помпажу. У результаті багатопараметричного злиття основних параметрів, що характеризують роботу відцентрового нагнітача газоперекачувального агрегату, отримано сумарний випадковий сигнал, який підпорядковується нормальному закону розподілу, що відповідає твердженню теореми Ляпунова, що дозволяє проектувати контури систем автоматичного антипомпажного захисту, які інваріантні щодо функціонального розподілу випадкового процесу діючого в контурі зворотного зв'язку.

Запропоновано модель визначення зон втрати стійкості розв'язків системи диференціальних рівнянь та встановлено що, явище помпажу корелює з втратою стійкості розв'язків системи, яка описує взаємозв'язок між параметрами (тиск та витрата), які контролюються на діючих компресорних станціях. Встановлено тип кожної із точок положення рівноваги та визначено як відповідні значення характеризують явище помпажу або виникнення передпомпажних ефектів.

Розроблено структуру автоматичного пристрою виявлення явища помпажу в системі “відцентровий нагнітач газоперекачувального агрегату - трубопровід”, яка основана на ефекті злиття даних реалізованого на засадах технології Data Fusion, що дало змогу підвищити ймовірність безаварійної роботи газоперекачувальних агрегатів.

Розроблено гібридну нейро-нечітку мережу для злиття даних і виявлення явища помпажу на основі адаптивної нейро-нечіткої системи виводу – Adaptive-Network-Based Fuzzy Inference System, що дало змогу обробляти інформацію про явище помпажу в режимі on-line і підвищити надійність захисту відцентрового нагнітача газоперекачувального агрегату від помпажу за допомогою системи автоматичного захисту.

Вперше розроблено інформаційну технологію раннього виявлення відхилення процесу компримування газу від нормальних робочих характеристик, що ґрунтується на багатовимірному аналізі і формуванні фазових портретів показників помпажу й порівнянні їх з атракторами. Якщо процес наближається до зони помпажу, то попередження шляхом сигналізації, або просто графічної зміни кольору передається на робочу станцію оператора для попередження про відхилення вимірювань від бажаного значення.

Удосконалено функціональну структуру системи автоматичного захисту “відцентровий нагнітач газоперекачувального агрегату - трубопровід”, в процесі компримування природного газу, яка, на відміну від існуючих, реалізує запропонований спосіб раннього виявлення втрати стійкості роботи цієї системи внаслідок початку розвитку обертового зриву, шляхом багатопараметричного злиття даних в контурі зворотного зв'язку, що характеризують роботу системи “відцентровий нагнітач газоперекачувального агрегату - трубопровід”. Це дозволяє розпізнавати стани об'єкта керування з мінімальною ймовірністю помилки розпізнавання станів керування, окрім цього система сприяє збільшенню технічного ресурсу відцентрових нагнітачів газоперекачувальних агрегатів, забезпечує стабільність і безперебійність перекачування газу.

Запропонований у роботі метод автоматичного антипомпажного захисту системи “ВН ГПА – ТП” дозволяє проектувати в складі системи автоматичного керування газоперекачувальними агрегатами дотискувальних компресорних станцій підземних сховищ газу контури систем автоматичного захисту від помпажу, які робастні щодо порушення апріорних статистичних припущень і інваріантні щодо функціонального розподілу випадкового процесу діючого в контурі зворотного зв’язку.

Розроблена методика раннього виявлення відхилення процесу компримування газу від нормальних робочих характеристик дає змогу зменшити кількість позапланових ремонтів обладнання, викликаних виникненням помпажних явищ у нагнітачах, а також модель інтелектуальної системи виявлення відхилень технологічних процесів від нормальних робочих характеристик за умов невизначеності, що побудована на засадах інформаційної технології з використанням гібридної нейро-фаззі архітектури, що дозволить вирішувати задачі прогнозування та ідентифікації у реальному часі, прийняті для використання підприємствами, що підтверджується відповідними актами.

Ключові слова: автоматична система антипомпажного захисту; відцентровий нагнітач; газоперекачувальний агрегат; нейро-нечітка система; фазова траєкторія.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Наукові праці, в яких опубліковані основні наукові результати дисертації:

1. Фешанич Л. І., Олійник А. П. Метод виявлення явища помпажу у відцентрових нагнітачах газоперекачувальних агрегатів. *Вісник Національного технічного університету “Харківський політехнічний інститут”: Механіко-технологічні системи та комплекси*. Харків : НТУ “ХПІ”, 2017. № 19 (1241). С. 114-119. (Входить до міжнародної наукометричної бази *Ulrich's Periodicals Directory*).

Автором запропоновано використання фазових портретів для ідентифікації явища помпажу.

2. Фешанич Л. І. Явище помпажу у відцентрових нагнітачах газоперекачувальних агрегатів. *Науково-технічний журнал: Методи та прилади контролю якості*. Івано-Франківськ, 2017. № 1 (38). С. 64-68.

3. Фешанич Л. І., Семенцов Г. Н. Проблема відмови давачів і їх колективного спрацювання при експлуатації системи автоматичної системи антипомпажного керування. *Науково-технічний журнал: Методи та прилади контролю якості*. Івано-Франківськ, 2016. № 2 (37). С. 14-19.

Автором розроблено схему роботи комплексного давача первинної інформації.

4. Sementsov H. N., Feshanych L. I. Informative technology of early diagnosis of deviated gas compression process from normal gas process. *Науковий вісник Національного гірничого університету*. 2016. № 5. С. 137-143. (Входить до міжнародних наукометричних баз SciVerse Scopus, Index Copernicus Journals Master List, Ulrich's Web Global Serials Directory, Research Bib Journal Database)

Автором запропоновано технологію раннього виявлення відхилення процесу компримування газу від нормальних робочих характеристик.

5. Семенцов Г. Н., Фешанич Л. І. Інформаційна технологія підвищення швидкодії автоматичного захисту компресора від помпажу на основі злиття даних. *Вісник національного технічного університету "Харківський політехнічний інститут": Механіко-технологічні системи та комплекси*. Харків, 2015. № 5. С. 68 – 82.

Автором проаналізовано існуючі інформаційні технології, запропоновано структурну схему системи антипомпажного захисту ГПА.

6. Фешанич Л. І. Експериментальна оцінка статистичних характеристик вібрації передньої опори нагнітача газоперекачувального агрегату / Л. І. Фешанич // *Технологічний аудит та резерви виробництва*. Харків, 2014. Том 6, № 4(20). С. 31-33. (Входить до міжнародних наукометричних баз Ulrich's

Periodicals Directory, DRIVER, Bielefeld Academic Search Engine (BASE), Index Copernicus, WorldCat, PISC, Directory of Open Access Journals (DOAJ), EBSCO, ResearchBib, American Chemical Society, Directory Indexing of International Research Journals, Directory of Research Journals Indexing (DRJI), CrossRef, Open Academic Journals Index (OAJI), Sherpa/Romeo).

7. Семенцов Г. Н., Фешанич Л. І. Аналіз законів розподілу випадкових процесів, отриманих в результаті багатопараметричного злиття даних. *Науковий журнал «Технологічні комплекси»*. Луцьк, 2014. № 2(10). С. 43-49. *(Входить до міжнародних наукометричних баз Index Copernicus, Ulrich's Periodicals Directory, PISC, Directory Indexing of International Research Journals).*

Автором досліджено справедливість теореми Ляпунова щодо нормального розподілу сумарного сигналу.

8. Давиденко Л. І. Експериментальна оцінка законів розподілу випадкових процесів у системі автоматичного керування газоперекачувальним агрегатом дотискувальної компресорної станції підземного сховища газу. *Всеукраїнський науково-технічний журнал: Нафтогазова енергетика*. Івано-Франківськ, 2014. № 1 (21). С. 64-69.

9. Семенцов Г. Н., Давиденко Л. І. Розвиток інформаційного забезпечення системи автоматичного антипомпажного захисту та регулювання газоперекачувального агрегату. *Восточно-Европейский журнал передовых технологий. Математическое и информационное обеспечение компьютерно-интегрированных систем управлений*. – Харьков, 2014. – № 4/11(70). – С. 20-25. *(Входить до міжнародних наукометричних баз Ulrich's Periodicals Directory, DRIVER, Bielefeld Academic Search Engine (BASE), Index Copernicus, WorldCat, PISC, Directory of Open Access Journals (DOAJ), EBSCO, ResearchBib, American Chemical Society, Directory Indexing of International Research Journals, Directory of Research Journals Indexing (DRJI), CrossRef, Open Academic Journals Index (OAJI), Sherpa/Romeo).*

Автором запропоновано узагальнену функціональну структуру системи антипомпажного регулювання та захисту ВН ГПА.

10. Sementsov G. N., Blyaut J. E., Davydenko L. I. Metodi di identificazione automatica del reale dei Fornitori pressione compressori centrifughi prestazioni trattamento del gas unit. *Italian Academic and Scientific Journal*. 2014. Issue 8(17). p.100-105.

Автором запропоновано інформаційну модель для витратно-напірних характеристик.

11. Sementsov G. N., Blyaut J. E., Davydenko L. I. Metodo di identificazione delle caratteristiche di consumo pressione di unità di compressione gas centrifughe. *Italian Academic and Scientific Journal*. 2014. Issue 5(14). p. 372-376.

12. Давиденко Л. І., Семенцов Г. Н. Методи злиття даних для виявлення явища помпажу у відцентрових нагнітачах газоперекачувальних агрегатів. *Науковий вісник Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу*. Івано-Франківськ, 2013. № 2(35). С.174-181.

Автором проведено детальний аналіз методів злиття даних.

Наукові праці, що засвідчують апробацію матеріалів дисертації:

13. Фешанич Л. І. Виявлення явища помпажу у відцентрових нагнітачах газоперекачувальних агрегатів. *Автоматика – 2017 : XXIV Міжнародна конф. з автоматичного управління*, 13-16 вересня 2017. Київ, 2017. С. 123-124.

14. Фешанич Л. І., Семенцов Г. Н. Удосконалення структури системи автоматичного антипомпажного захисту відцентрового нагнітача газоперекачувального агрегату. *Автоматика – 2016 : XXIII Міжнародна конф. з автоматичного управління*, 22-23 вересня 2016. Суми, 2016. – С. 74-75.

Автором запропоновано функціональну структуру, що реалізує спосіб автоматичного захисту ГПА.

15. Фешанич Л. І. Синтез спостерігача класів станів відцентрового нагнітача газоперекачувального агрегату за умов невизначеності. *Технологічні комплекси – 2016: VI Міжнародна науково-технічна конференція*, 26-28 травня 2016. Луцьк, 2016. – С. 31-32.

16. Feshanych L. I., Sementsov G. N. Intelligent analysis of multiparameter data based on the adaptive neuro-fuzzy system. *Data Steam Mining and Processing : IEEE First International Conference*, 23-27 August 2016. Lviv, 2016. p. 117-119.

Автором запропоновано нейро-нечітку систему для вирішення проблеми ідентифікації явища помпажу на ранніх стаціях.

17. Фешанич Л. І., Семенцов Г. Н. Модель Multiple Input-Multiple Output газоперекачувального агрегату. *Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології – 2016 : III Міжнародна наук.-практ. конф. молодих учених, аспірантів і студентів*, 20-21 квітня 2016. Київ, 2016. С. 104-106.

Автором запропоновано модель Multiple Input – Multiple Output ГПА як багатовимірною об'єкта.

18. Семенцов Г. Н., Фешанич Л. І. Використання технології злиття даних на основі JDL-моделі для підвищення ефективності антипомпажного захисту газоперекачувальних агрегатів. *Автоматика – 2015 : XXII Міжнародна конф. з автоматичного управління*, 10-11 вересня 2015. Одеса, 2015. С. 166-167.

Автором запропоновано технологію злиття контрольованих параметрів на основі JDL-моделі.

19. Фешанич Л. І. Використання DF-методів для вдосконалення інформаційного забезпечення системи автоматичного керування. *Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології – 2015 : II Міжнародна наук.-практ. конф. молодих учених, аспірантів і студентів*, 15-16 квітня 2015. Київ, 2015. – С.104-106.

20. Семенцов Г. Н., Фешанич Л. І. Використання DF-методів для моніторингу технічного стану газоперекачувальних агрегатів. *Обчислювальний інтелект : III Міжнародна наук.-практ. конф.*, 12-15 травня 2015. Черкаси, 2015. С. 254-256.

Автором проаналізовано сучасні технології для моніторингу технічного стану ГПА.

21. Семенцов Г. Н., Фешанич Л. І. Інформаційна технологія діагностування стану газоперекачувального агрегату на основі злиття даних. *Проблеми*

розвитку впровадження інформаційних технологій в наукову і інноваційну сферу освіти : XI Міжнародна конф., 28 листопада 2014. Дніпропетровськ, 2014. С. 2-4.

Автором розроблено загальну схему організації процедури злиття даних.

22. Семенцов Г. Н., Фешанич Л. І. Інформаційна технологія на основі злиття даних для діагностування технічного стану газоперекачувальних агрегатів. *Сучасні прилади, матеріали і технології для неруйнівного контролю і технічної діагностики машинобудівного і нафтогазопромислового обладнання* : 7-ма Міжнародна наук.-техн. конф. і виставка, 25-28 листопада 2014. Івано-Франківськ, 2014. С. 112-114.

Автором запропоновано структуру системи антипомпажного регулювання та захисту ВН ГПА, що побудована з використанням технології злиття даних.

23. Давиденко Л. І. Надлишкові вимірювання та злиття даних в системі антипомпажного регулювання та захисту відцентрового нагнітача. *Автоматика – 2014* : XXI Міжнародна конф. з автоматичного управління, 23-27 вересня 2014. Київ, 2014. С. 50-52.

24. Давиденко Л. І. Ідентифікація нечіткої міри за обмежень, які накладаються експертом на параметри інтеграла Шоке. *Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології – 2014* : I Міжнародна наук.-практ. конф. молодих учених, аспірантів і студентів, 16-17 квітня 2014. Київ, 2014. – С. 23-24.

25. Давиденко Л. І., Семенцов Г. Н. Виявлення явища помпажу відцентрових нагнітачів газоперекачувальних агрегатів на основі методу злиття даних. *Нафтогазова енергетика – 2013* : Міжнародна наук.-техн. конф., 7-11 жовтня 2013. Івано-Франківськ, 2013. С. 460-463.

Автором запропоновано застосування технології злиття даних для опрацювання інформації.

SUMMARY

Feshanych L. I. The Improvement Of The Informative Support Of The Anti-surge Protection System Of The Centrifugal Gas-Pumping Unit Supercharger Based On The Artificial Intelligence – 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.

In the research the actual scientific and practical task, the main aim of which was to improve the dynamic method of automatic anti-surge protection of the system "centrifugal supercharger of the gas pumping unit - the pipeline" of the compressor station of the underground storage of gas on the basis of early detection of deviations of the technological-gas compression process from normal operating characteristics, being achieved by the using of merging data informative technology, has been solved.

The increasing of the gas transmission system automatic level, mainly compressor stations, must be accompanied by the increase of the speed and reliability not only the automatic control but also automatic anti-surge protection of gas pumping units. Known methods used for diagnosing the state of centrifugal superchargers of gas pumping units are inextricably linked with the real-time processing of a large number of controlled parameters. Since the volume of data on the actual technical-state of gas pumping units is quite large and does not allow to analyze all available information by a human operator himself, it is expedient to apply modern methods, in particular, methods of artificial intelligence.

A review of the problem of automatic anti-surge protection of centrifugal superchargers of gas-pumping units of the compressor station of underground gas storage was performed. Having analyzed the main advantages and disadvantages of existing methods, it has been established that the effectiveness of existing automatic anti-surge protection systems does not fully meet the requirements of the technological process, and trends of their development and improvement have been

revealed. It was concluded that the most effective methods of automatic anti-surge protection of the system "centrifugal supercharger of the gas pumping unit - the pipeline" were the methods of computing intelligence, in particular the informative technology Data Fusion (data fusion) was adapted to the operating conditions at the compressor station of underground gas storage.

From the position of automation of control processes, the task of data merge in the system of automatic control of a gas-pumping unit with a gas turbine drive should be considered as a way to increase the efficiency of the relationship between the object of control and automotive control devices, which allow to combine the advantages of stochastic properties of individual controlled parameters with computing capabilities of microprocessor technology.

The descriptive physical model of the interaction of mechanical, thermal and gasdynamic processes in the system of centrifugal supercharging of a gas-pumping unit with a gas turbine drive has been developed, which allowed to determine the directions of further research on the improvement of the method by merging (merging) information about the observed random process and the use of new methods of information processing.

The analysis of the connections of the mathematical model of the process of gas compression with gas turbine driven gas compressor unit has been developed, It enabled to formulate an algorithm for the operation of the control object taking into account the constraints of the individual components of the state vectors, the control actions and external influences, to determine the matrix of the transmission function, the model of the type Multi Input - Multi Output of the centrifugal supercharger of the gas-pumping unit as a multidimensional object of anti-surge protection and a method for determining the function of the transmission of the centrifugal supercharger based on observations.

The approach to solving the problem of synthesis of the observer states of the centrifugal superchargers of the gas-pumping aggregate under the conditions of current uncertainty, making it possible to formulate a criterion in the form of a mathematical formulation of the research problem, to synthesize the algorithmic

structure of the automatic anti-surge protection system of the centrifugal supercharger of the gas-pumping aggregate as a multidimensional object with an observer of its states in the form of a model in the variables state was done

The universal functional structural system of the antisurge protection of the centrifugal supercharger of the gas-pumping unit on the basis of the neuro-fuzzy network has been developed, which allowed to improve the accuracy of the diagnostics of their technical condition, to increase the efficiency and efficiency of the operator's control of gas-pumping units by using modern technical means of control and management.

The analysis of statistical characteristics of the fluctuations of the parameters describing the phenomenon of the storm has been carried out. As a result of the multiparameter merging of the main parameters characterizing the work of the centrifugal supercharger of a gas-pumping unit, a total random signal was obtained according to the normal distribution law corresponding to the statement of Lyapunov's theorem, which allowed the design of contours of automatic antisurge protection systems being invariant under the functional distribution of the random process of feedback loop.

The model of determination of zones of loss of stability of solutions of the system of differential equations was proposed. it was established the phenomenon of the fall correlates with the loss of stability of the system solutions, describing the relationship between the parameters (pressure and flow), controlled at the operating compressor stations. The type of each of the points of equilibrium position was determined and the relevant values were defined as the phenomenon of a storm or the appearance of pre-exiting effects.

The structure of the automatic device for detecting the phenomenon of the pump in the system "centrifugal supercharger of the gas pumping unit - pipeline" , based on the effect of data fusion realized on the basis of the technology Data Fusion, making it possible to increase the probability of trouble-free operation of gas pumping units has been developed

A hybrid neuro-fuzzy network for merging data and detecting the phenomenon of a phenomenon on the basis of an adaptive neuro-fuzzy output system - the Adaptive-Network-Based Fuzzy Inference System , enabled to process information on the phenomenon of outbreak in the on-line mode and increase the reliability of the protection of the centrifugal supercharger of the gas pumping unit from falling through the system of automatic protection has been developed

The informative technology of early detection of the deviation of the process of gas compression from normal operating characteristics, based on multidimensional analysis and the formation of phase portraits of impulse parameters and comparable with attractors, has been developed for the first time. When the process approaches the penetration zone, warning by signaling, or simply a graphical color change, is transmitted to the operator's workstation to warn about the deviation of measurements from the desired value.

The functional structure of the automatic protection system "centrifugal supercharger of the gas-pumping unit - the pipeline" has been improved, in the process of compressing natural gas, which, unlike existing ones, implements the proposed method of early detection of the loss of stability of this system due to the beginning of the development of the rotational breakage, by multiparameter data fusion in the circuit feedback, characterizing the work of the system "centrifugal supercharger gas-pumping unit - pipeline". This allows to recognize the states of the control object with a minimum probability of error recognition of control states, in addition, this system contributes to the increase of the technical resource of centrifugal superchargers of gas pumping units, ensures stability and continuity of gas pumping.

The method of automatic anti-surge protection of the system "VN GPA-TP" allows to design, in the composition of the automatic control system of gas-pumping units of compressed stations of underground gas storage facilities, the contours of automatic protection systems from the impulse which are robust with respect to the violation of a priori statistical assumptions and invariant with respect to the functional distribution of the random process active in the feedback loop.

The developed technique of early detection of the deviation of the process of gas compression from normal operating characteristics, enables to reduce the number of unscheduled repairs of equipment caused by the occurrence of excitement phenomena in superchargers, as well as the model of the intellectual system for detecting deviations of technological processes from normal operating characteristics in the conditions of uncertainty, which is based on the principles of information technology using a hybrid neurophase architecture that will enable prediction and identification tasks nowadays taken by enterprises, as confirmed relevant acts.

Key words: automatic anti-surge protection system; centrifugal supercharger; gas pumping unit; neuro-fuzzy system; phase trajectory.

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

АГК – аналіз головних компонент;
АЗ – аварійний зупин;
ANFIS – адаптивна нейро-нечітка система виводу;
АП – автоматичний пуск;
АПЗ – антипомпажний захист;
АПК – антипомпажний клапан;
АПР – антипомпажний регулятор;
АР – антипомпажне регулювання;
АСК – автоматична системи керування;
АЦП – аналого–цифровий перетворювач;
БПЗ – базове програмне забезпечення;
ВН – відцентровий нагнітач;
ВПК – візуалізація паралельних координат;
ГК – головні компоненти;
ГПА – газоперекачувальний агрегат;
ГТП – газотурбінний привод;
ГТС – газотранспортна система;
ГТУ – газотурбінна установка;
ДГ – дозатор газу;
ДКС – дотискувальна компресорна станція;
DF – data fusion – об’єднання (злиття) даних;
ЖП – жорсткий помпаж;
ЗП – задаючий пристрій;
ЕТ – електричний тракт;
КЗ – камера згоряння;
ККД – коефіцієнт корисної дії;
КС – компресорна станція;

ЛД – лінійна ділянка;

MI-MO – Multiple Input-Multiple Output;

МЖ – стан м'якого помпажу;

НЗ – режим нормального зупину;

ОК – об'єкт керування;

ОРС – режим реального часу;

ПК – пристрій керування;

PLC контролер – програмований логічний контролер;

ПП – передпомпажний стан;

ППЗ – прикладне програмне забезпечення;

ПСГ – підземне сховище газу;

РКТ – режим компримування газу;

РСО – робоча станція оператора;

САК – система автоматичного керування;

СС – спостерігач станів;

СШ – системна шина;

ТП – трубопровід;

ХП – холодне прокручування;

ЦАП – цифро-аналоговий перетворювач;

ШНМ – штучна нейронна мережа.

ЗМІСТ

	Стор.
ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ, ОДИНИЦЬ, СКОРОЧЕНЬ ТА ТЕРМІНІВ.....	17
ВСТУП.....	22
РОЗДІЛ 1	
АНАЛІЗУВАННЯ МЕТОДІВ ТА ТЕХНІЧНИХ ЗАСОБІВ АНТИПОМПАЖНОГО ЗАХИСТУ ВІДЦЕНТРОВИХ НАГНІТАЧІВ ГАЗОПЕРЕКАЧУВАЛЬНИХ АГРЕГАТІВ.....	30
1.1. Характеристика об'єкта керування.....	30
1.2. Аналізування методів визначення моментів входу робочої точки відцентрового нагнітача в зону помпажу.....	36
1.3. Способи виявлення ознак помпажу компресорів і формування інформативних сигналів.....	41
1.4. Вибір методу та аналіз проблем, що виникають під час розроблення системи антипомпажного захисту компресорів ДКС ПСГ.....	49
1.5. Теоретичне обґрунтування методу злиття даних для виявлення явища помпажу у відцентрових нагнітачах ГПА.....	51
1.6. Вибір та обґрунтування напрямку проведення досліджень.....	59
РОЗДІЛ 2	
ТЕОРЕТИЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ МЕТОДУ АВТОМАТИЧНОГО АНТИПОМПАЖНОГО ЗАХИСТУ СИСТЕМИ “ВІДЦЕНТРОВИЙ НАГНІТАЧ ГАЗОПЕРЕКАЧУВАЛЬНОГО АГРЕГАТУ - ТРУБОПРОВІД” НА ЗАСАДАХ ШТУЧНОГО ІНТУЛУКТУ.....	62
2.1. Розроблення описової фізичної моделі у системі автоматичного керування ВН ГПА з газотурбінним приводом.....	62
2.2. Аналіз зв'язків між параметрами математичної моделі процесу компримування газу ГПА з газотурбінним приводом.....	69

2.3. Постановка задачі синтезу спостерігача станів ВН ГПА за умов невизначеності.....	76
2.4. Розроблення методу антипомпажного захисту ВН ГПА на засадах адаптивної нейро-нечіткої мережі.....	80
Висновки до розділу 2.....	83

РОЗДІЛ 3

ЕКСПЕРЕМЕНТАЛЬНО-ТЕОРЕТИЧНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ЩОДО РОЗРОБЛЕННЯ НОВОГО МЕТОДУ ОБРОБЛЕННЯ ІНФОРМАЦІЙНИХ СИГНАЛІВ У САК ГПА.....

85

3.1. Обґрунтування методу оброблення інформації в САК ГПА на засадах багатопараметричного злиття даних.....	85
3.2. Аналізуванні контрольованих параметрів, які характеризують передпомпажний стан відцентрового нагнітача	87
3.2.1. Аналізування закону розподілу випадкового процесу, отриманого в результаті багатопараметричного злиття параметрів.....	91
3.3. Розроблення інформаційної технології автоматичного захисту компресора від помпажу на основі технології злиття даних.....	97
3.4. Метод виявлення явища помпажу у відцентрових нагнітачах ГПА...	108
Висновки до розділу 3.....	115

РОЗДІЛ 4

ОПИС РЕАЛІЗАЦІЇ ЗАПРОПОНОВАНОГО МЕТОДУ ОБ'ЄДНАННЯ ДАНИХ У ЗАДАЧАХ АНТИПОМПАЖНОГО ЗАХИСТУ ВН ГПА ЗА УМОВ НЕВИЗНАЧЕНОСТІ ЗОВНІШНІХ ЗБУРЕНЬ.....

117

4.1. Структура автоматичного пристрою виявлення явища помпажу в системі “ВН ГПА - ТП”.....	117
4.2. Інтелектуальна обробка багатопараметричних даних на основі адаптивної нейро-нечіткої системи виводу в САК ГПА.....	121
4.3 Інформаційна технологія раннього виявлення відхилення процесу	

компримування газу від нормальних робочих характеристик.....	130
4.4. Удосконалення функціональної структури системи автоматичного антипомпажного захисту, що реалізує спосіб захисту ГПА від помпажу на засадах інформаційної технології Data Fusion.....	140
Висновки до розділу 4	147
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ.....	148
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	151
ДОДАТКИ.....	164

ВСТУП

Актуальність теми. Однією з важливих науково-практичних завдань газотранспортної системи України є забезпечення стійкої роботи газоперекачувальних агрегатів (ГПА) і запобігання явища помпажу в них шляхом створення швидкодіючих автоматичних систем антипомпажного регулювання (АПР) та антипомпажного захисту (АПЗ), насамперед це стосується забезпечення стійкості роботи системи “відцентровий нагнітач ГПА – трубопровід (ТП)” дотискувальних компресорних станцій (ДКС) підземних сховищ газу (ПСГ) при змінах динамічного опору в колекторі системи збору газу. Питання захисту компресорів від помпажу і антипомпажного регулювання розкриті в роботах вітчизняних та зарубіжних учених, серед яких слід виокремити: Акульшина Ю. Д., Веселовського В. Г., Городецького О. В., Гуренка В. М., Казакевича В. В., T. Downer, I. R. Baher, E. O. King, I. F. Kuhlberg, H. Pearson, D. E. Shepperd, Бляута Ю. Є., Беккера М. В., Гіренка С. Г., Петеша М. О., Репета А. Ф., Семенцова Г. Н., Сукача О. В., Шимка Р. Я та інших. Проте науковий аналіз публікацій і досліджень показав, що відомі методи антипомпажного захисту не цілком відповідають сучасному рівню автоматизації та інформативного забезпечення систем автоматичного керування (САК) ГПА. Вони мають істотні обмеження, серед яких – неможливість використання інформації від багатовимірної системи контролю САК ГПА для задач АПЗ в реальному часі.

Вирішення цього завдання пов’язане з розробленням динамічних методів оцінювання процесу компримування газу, що ґрунтується на ефекті виявлення в реальному часі автоколивань у проточній частині ВН ГПА, застосуванні швидкодіючих антипомпажних клапанів, а також малоінерційних ланок багатовимірної системи контролю в контурі зворотного зв’язку системи АПЗ.

Тому на сьогодні актуальним є удосконалення інформаційного забезпечення САК ГПА шляхом раннього виявлення відхилень процесу компримування газу від норми і застосування інформаційної технології об’єднання даних (Data Fusion), що дозволить підвищити швидкодію системи

АПЗ і надійність компримування газу, а також допустимий діапазон роботи ВН ГПА.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.

Дисертаційну роботу виконано відповідно до основного наукового напрямку діяльності кафедри автоматизації та комп'ютерно-інтегрованих технологій Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу (ІФНТУНГ). Тематика роботи є частиною планових науково дослідних робіт із розвитку нафтогазового комплексу України та ґрунтується на результатах держбюджетної теми “Синтез комп'ютерних систем та розробка програмного забезпечення для об'єктів нафтового комплексу” (№ДР 0111U005890), де здобувач, як виконавець, синтезував структуру системи автоматичного антипомпажного захисту системи “ВН ГПА – ТП”, що дозволяє розв'язувати задачі розпізнавання станів об'єкта керування в реальному часі і захищати його від помпажу.

Мета і задачі дослідження. Метою роботи є підвищення надійності процесу компримування природного газу шляхом ефективного автоматичного антипомпажного захисту системи “відцентровий нагнітач газоперекачувального агрегату – трубопровід”, що досягається вдосконаленням інформаційного забезпечення системи автоматичного керування газоперекачувальним агрегатом на засадах інформаційної технології злиття даних.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі завдання:

- проаналізувати сучасні методи автоматичного антипомпажного захисту та регулювання компресорів;
- встановити закон розподілу, а також оцінити статистичні характеристики сумарного спостережуваного випадкового процесу в контурі зворотного зв'язку САК ГПА на основі аналізу наявних даних експериментального дослідження процесів, що характеризують явище помпажу в системі “ВН ГПА – ТП”;

- обґрунтувати і дослідити інформаційну технологію об'єднання (злиття) багатовимірних даних, що характеризують явище помпажу;
- визначити зв'язок між типом точки положення рівноваги на виникненням коливальних явищ у відцентрових нагнітачах газоперекачувальних агрегатів;
- синтезувати структуру системи автоматичного антипомпажного захисту системи “ВН ГПА – ТП” у складі САК ГПА;
- апробувати розроблені методи, моделі та результати на промислових даних, проаналізувати і узагальнити результати дослідження.

Об'єктом дослідження є явище помпажу в системі “відцентровий нагнітач газоперекачувального агрегату – трубопровід” дотискувальних компресорних станцій.

Предметом дослідження є інформаційне забезпечення систем автоматичного керування газоперекачувальними агрегатами.

Методи дослідження. Для вирішення поставлених завдань використано: методи порівняльного аналізу, систематизації та узагальнення (для аналізу способів захисту від помпажу), методи теорії автоматичного керування та алгоритмів цифрової обробки сигналів статичних і динамічних властивостей об'єкта та елементів системи антипомпажного регулювання і захисту; методи математичної статистики (для визначення законів розподілу, кореляційних моделей процесів і підтвердження вірогідності отриманих теоретичних результатів); методи Data Fusion (для об'єднання даних, що характеризують явище помпажу); методи схемо- та системотехніки (для розроблення структури автоматизованої системи антипомпажного захисту відцентрового нагнітача); методи теорії стійкості диференціальних рівнянь, механіки газодинамічних машин, методи чисельного розв'язку звичайних диференціальних рівнянь (для знаходження типу точок положення рівноваги), методи теорії штучних нейронних мереж та нечіткої логіки (для синтезу спостерігача) та методи імітаційного експерименту, що підтвердили вірогідність отриманих теоретичних результатів.

Наукова новизна полягає в поглибленні та розвитку методологічних підходів щодо автоматичного антипомпажного захисту системи “відцентровий нагнітач газоперекачувального агрегату – трубопровід” шляхом багатопараметричного злиття даних у контурі зворотного зв’язку системи та визначається такими науковими результатами.

Вперше:

- встановлено закон розподілу, а також здійснено оцінювання статистичних характеристик спостережуваного випадкового процесу в контурі зворотного зв’язку системи антипомпажного захисту, що дозволяє виробити рекомендації щодо синтезу структури системи автоматичного антипомпажного захисту ВН;

- розроблено інформаційну технологію раннього виявлення відхилення процесу компримування газу від нормальних робочих характеристик, що ґрунтується на формуванні фазових портретів показників, які характеризують явище помпажу та їхньому порівнянні з атрactorами, що дозволяє відображати наближення процесу до зони помпажу і попереджувати про відхилення вимірювань від бажаного значення;

- обґрунтовано технологію багатовимірної злиття даних при виявленні явища помпажу в системі “ВН ГПА – ТП” на основі раннього виявлення відхилень технологічного процесу компримування природного газу від норми на основі адаптивної нейро-нечіткої системи, що дозволяє отримати оцінки станів ВН ГПА;

- запропоновано метод визначення зон втрати стійкості розв’язків системи диференціальних рівнянь, який дозволяє встановити, що явище помпажу корелює з втратою стійкості розв’язків системи, яка описує взаємозв’язок між контрольованими параметрами на діючих компресорних станціях та встановлено тип кожної з точок положення рівноваги, що дозволило визначити відповідні їхні значення, що характеризують явище помпажу або виникнення передпомпажних ефектів.

Удосконалено:

– функціональну структуру системи автоматичного захисту “ВН ГПА – ТП”, яка, на відміну від існуючих, реалізує запропонований спосіб раннього виявлення втрати стійкості роботи цієї системи внаслідок початку розвитку обертального зриву, шляхом багатопараметричного злиття даних у контурі зворотного зв’язку, що характеризують роботу системи “ВН ГПА – ТП”. Це дозволяє розпізнавати стани об’єкта керування з мінімальною ймовірністю помилки розпізнавання станів керування. Окрім цього система сприяє збільшенню технічного ресурсу ВН ГПА, забезпечує стабільність і безперебійність перекачування газу.

Основні положення, винесені на захист: удосконалений підхід до інформаційного забезпечення САК ГПА, який передбачає підвищення швидкодії та точності підсистеми автоматичного антипомпажного захисту ланки “ВН ГПА – ТП”, що функціонує в складі САК ГПА, шляхом злиття даних, які характеризують явище помпажу, на засадах інформаційної технології Data Fusion; комплекс математичних моделей статистики і динаміки процесу компримування природного газу, адекватних розв’язуванню задач аналізу, синтезу та автоматичного антипомпажного захисту, які отримані як аналітичними, так і комбінованими методами, в тому числі і з використанням кореляційно-регресійного аналізу; результати досліджень властивостей ГПА з газотурбінним приводом та процесу його функціонування в передпомпажних режимах; постановку задачі оптимізації підсистеми автоматичного захисту ГПА; функціональну структуру підсистеми автоматичного антипомпажного захисту ГПА, що побудовано на засадах Data Fusion, у складі САК ГПА; метод ідентифікації видів помпажу на основі застосування комплексу інформативних параметрів і інформаційної технології раннього виявлення відхилень процесу компримування газу від норми, метод визначення зон втрати стійкості розв’язків системи диференціальних рівнянь.

Практичне значення одержаних результатів. Запропонований у роботі метод автоматичного антипомпажного захисту системи “ВН ГПА – ТП”

дозволяє проектувати в складі САК ГПА ДКС ПСГ контури систем автоматичного захисту від помпажу, робастні щодо порушення апріорних статистичних припущень і інваріантні щодо функціонального розподілу випадкового процесу діючого в контурі зворотного зв'язку. Наукові пояснення та висновки, викладені в роботі, статтях та інших публікаціях прийняті для використання підприємствами, що підтверджується відповідними актами.

Розроблена методика раннього виявлення відхилення процесу компримування газу від нормальних робочих характеристик, яка побудована на основі гібридної нечіткої нейронної мережі, що дає змогу зменшити кількість позапланових ремонтів обладнання, викликаних виникненням помпажних явищ у нагнітачах, прийнята до використання та впровадження на філії УМГ «Прикарпаттрансгаз» ПАТ «Укртрансгаз» (акт про впровадження від 19.11.2015 р.).

Розроблена модель інтелектуальної системи виявлення відхилень технологічних процесів від нормальних робочих характеристик за умов невизначеності, побудована на засадах інформаційної технології з використанням гібридної нейро-фаззи архітектури, що дозволить вирішувати завдання прогнозування та ідентифікації у реальному часі, прийнята до використання та впровадження ТзОВ «МІКРОЛ» – (акт про впровадження від 17.11.2015 р.).

Окремі розділи роботи використані в навчальному процесі ІФНТУНГ на кафедрі автоматизації та комп'ютерно-інтегрованих технологій при викладанні дисциплін “Автоматизація технологічних процесів нафтової і газової промисловості” для студентів спеціальності 151 – автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології (акт про впровадження від 9.11.2015 р.).

Особистий внесок здобувача. Усі основні наукові положення та результати дисертаційної роботи, винесені на захист, отримані здобувачем особисто. У роботах, написаних із співавторами, автору належать такі результати: [1] – запропоновано використання фазових портретів для ідентифікації явища помпажу; [3] – розроблено схему роботи комплексного

давача первинної інформації; [4] – запропоновано технологію раннього виявлення відхилення процесу компримування газу від нормальних робочих характеристик; [5] – проаналізовано існуючі інформаційні технології, запропоновано структурну схему системи антипомпажного захисту ГПА; [7] – досліджено справедливність теореми Ляпунова щодо нормального розподілу сумарного сигналу; [9] – запропоновано узагальнену функціональну структуру системи антипомпажного регулювання та захисту ВН ГПА; [10,11] – запропоновано інформаційну модель для витратно-напірних характеристик; [12] – проведено детальний аналіз методів злиття даних; [14] – запропоновано функціональну структуру, що реалізує спосіб автоматичного захисту ГПА; [16] – запропоновано нейро-нечітку систему для вирішення проблеми ідентифікації явища помпажу на ранніх стаціях; [17] – запропоновано модель МІ-МО ГПА як багатовимірний об'єкт; [18] – запропоновано технологію злиття даних на основі JDL-моделі; [20] – проаналізовано технології для моніторингу технічного стану ГПА; [21] – розроблено загальну схему організації процедури злиття даних; [22] – запропоновано структуру системи антипомпажного регулювання та захисту ВН ГПА, що побудована з використанням технології злиття даних; [25] – запропоновано застосування технології злиття даних для опрацювання інформації.

Апробація результатів дисертації. Основні результати дисертаційної роботи доповідались та обговорювались на розширених наукових семінарах кафедри автоматизації та комп'ютерно-інтегрованих технологій (м. Івано-Франківськ, 2015, 2018); міжнародних наукових конференціях, таких як: Міжнародна науково-технічна конференція “Нафтогазова енергетика 2013” (м. Івано-Франківськ, 2013); XXI-XXIV Міжнародні конференції з автоматичного управління «Автоматика» (м. Київ, 2014; м. Одеса, 2015; м. Суми, 2016; м. Київ, 2017); 7-ма Міжнародна науково-технічна конференція і виставка “Сучасні прилади, матеріали і технології для неруйнівного контролю і технічної діагностики машинобудівного і нафтогазопромислового обладнання” (м. Івано-Франківськ, 2014);. XI Міжнародна конференція “Проблеми розвитку

впровадження інформаційних технологій в наукову і інноваційну сферу освіти” (м. Дніпропетровськ, 2014); I - III Міжнародні науково-практичні конференції молодих учених, аспірантів і студентів “Автоматизація та комп’ютерно-інтегровані технології” (м. Київ, 2014, 2015, 2016); III міжнародна науково-практична конференція “Обчислювальний інтелект” (м. Черкаси, 2015); IEEE First International Conference on Data Stream Mining and Processing (Lviv, 2016); VI Міжнародна науково-технічна конференція Технологічні комплекси – 2016 (м. Луцьк, 2016).

Публікації. Всього за темою дисертації опубліковано 25 робіт, у тому числі 9 статей у фахових науково-технічних журналах і 13 публікацій у збірниках наукових праць міжнародних науково-технічних конференціях; 5 статей в науково-метричних виданнях.

Структура та обсяг дисертації. Дисертація складається зі вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел та 7 додатків. Повний обсяг дисертації становить 185 сторінки; обсяг основного тексту – 138 сторінки, 44 рисунків; 2 таблиці; список використаних джерел, що включає 121 найменування та займає 13 сторінок; 7 додатків на 21 сторінках.

РОЗДІЛ 1

АНАЛІЗУВАННЯ МЕТОДІВ ТА ТЕХНІЧНИХ ЗАСОБІВ АНТИПОМПАЖНОГО ЗАХИСТУ ВІДЦЕНТРОВИХ НАГНІТАЧІВ ГАЗОПЕРЕКАЧУВАЛЬНИХ АГРЕГАТІВ

1.1. Характеристика об'єкта керування

Економічний розвиток України відбувається в мінливому зовнішньоекономічному середовищі, що сьогодні критично змінило характеристики впливу на країну від сприятливих і малосприятливих до кризових. За таких умов незалежність держави та розвиток економіки залежать від її забезпечення енергоресурсами, зокрема природним газом. Саме тому в Енергетичній стратегії України до 2030 року [1] акцентовано на забезпеченні паливно-енергетичного комплексу високоефективними технічними засобами і технологіями та висококваліфікованими фахівцями.

Газотранспортна система (ГТС) України включає 36,7 тис. км газопроводів, в тому числі 23,2 тис. км магістральних та 13,5 тис. км розподільних газопроводів, а також 78 компресорних станцій, в яких встановлено 800 газоперекачувальних агрегатів, загальною потужністю 5,6 млн кВт, 13 підземних сховищ газу, загальною облаштованою активною місткістю яких становить 34,5 млрд м³, 1300 газорозподільних станцій. Пропускна спроможність газотранспортної системи України на вході дорівнює 290 млрд м³ газу, а на виході – 170 млрд м³ [2].

Після дооблаштування ще двох підземних сховищ газу активна їхня місткість досягне 38 – 39 млрд м³ [3].

ГТС складається із послідовно з'єднаних транспортних комірок, в які входять компресорна станція (КС) і лінійна ділянка (ЛД) (рис.1.1.)

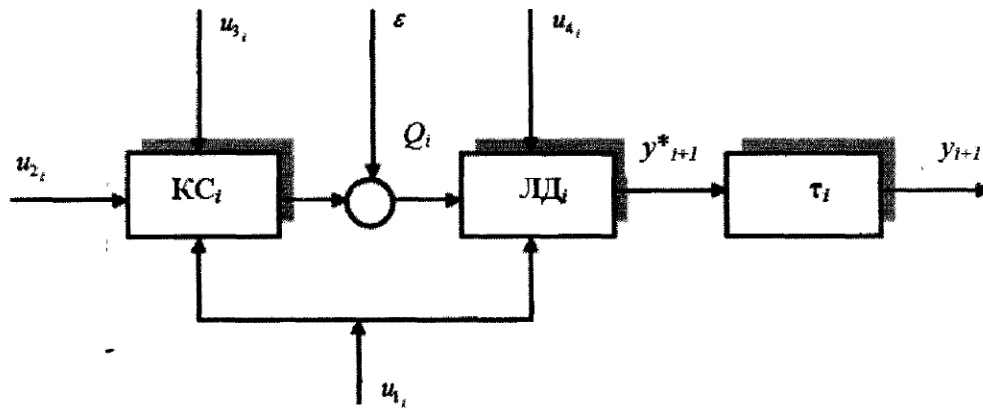


Рис. 1.1. Структурна схема i -ї транспортної комірки: u_{2i} – тиск всмоктування $p_{вс\ i}$, u_{3i} – температура всмоктування $T_{вс\ i}$, ε – неконтрольовані збурення, Q_i – витрата газу, u_{1i} – тиск нагнітача $p_{н\ i}$, u_{4i} – середня температура $T_{сер\ i}$, y_{i+1}^* – тиск i -ї транспортної комірки до елемента запізнення $p_{вс\ i+1}^*$, τ_i – час транспортного запізнення, y_{i+1} – тиск на виході транспортної комірки

Для опису i -ї транспортної комірки запропонована [4] модель у такому вигляді:

$$\left. \begin{aligned} y_{i+1}^*(k) &= A_i^T u_i(k), \\ y_{i+1}(k) &= y_{i+1}^*(k - \tau_i) + \varepsilon(k - \tau_i) \end{aligned} \right\}, \quad (1.1)$$

де k – дискретний час,

$$A_i^T = (a_{1i}, a_{2i}, a_{3i}, a_{4i}),$$

$$u_{вс\ i}^T = (u_{1i}, u_{2i}, u_{3i}, u_{4i}),$$

$a_{1i}, a_{2i}, a_{3i}, \dots, a_{si}$ – коефіцієнти лінеаризації.

З урахуванням нестационарності параметрів ГТС система рівнянь (1.1) має вигляд:

$$\left. \begin{aligned} y_{i+1}^*(k) &= A_i^T(k) u_i(k), \\ y_{i+1}(k) &= y_{i+1}^*(k - \tau_i) + \varepsilon(k - \tau_i) \end{aligned} \right\}. \quad (1.2)$$

Для підземних сховищ газу (ПСГ) типову комірку можна представити у такому вигляді (рис 1.2) [3,5].

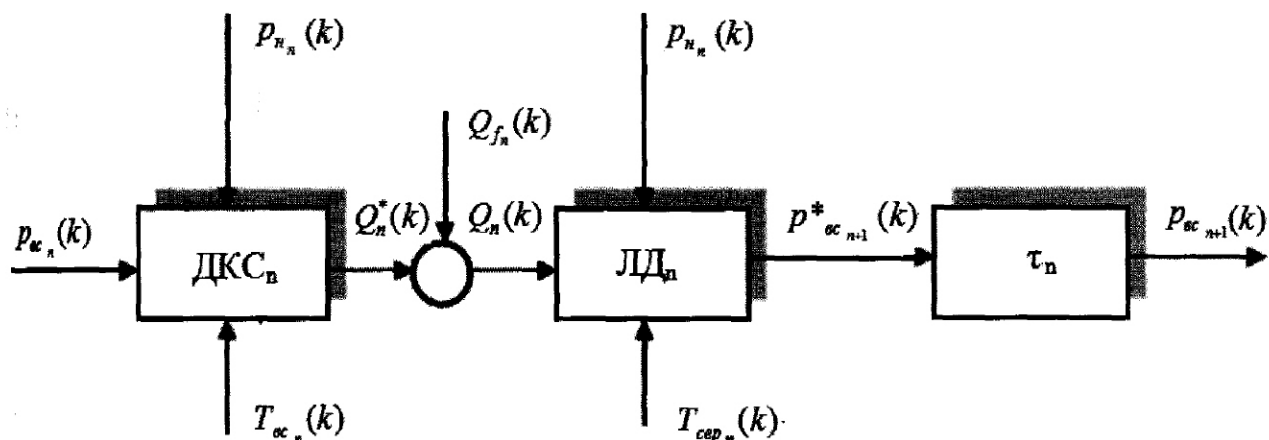


Рис. 1.2. Структурна схема типової транспортної комірки дотискувальної компресорної станції магістрального газопроводу: ДКС – дотискувальна компресорна станція, ЛД – лінійна ділянка, τ – запізнення

Стабілізування тиску і масової витрати i -ої транспортної комірки реалізується за допомогою локальних автоматичних систем регулювання.

Для того щоб така ділянка забезпечувала високу надійність функціонування єдиної системи газопостачання необхідно забезпечити стійку роботу компресорів ДКС ПСГ при змінах динамічного опору в колекторі системи збору газу, і надійний захист компресорів від помпажу.

Помпаж – це найбільш небезпечний режим роботи відцентрових нагнітачів (ВН) газоперекачувальних агрегатів (ГПА), який супроводжується значними коливаннями тиску, витрати і швидким зростанням температури газу. Зовнішніми ознаками помпажу є різкі періодичні удари, хлопки, підвищення вібрування, що може призвести до аварійної зупинки агрегата і, зокрема, руйнування окремих його вузлів.

Найбільш часто передпомпажні явища ВН виникають на дотискувальних компресорних станціях (ДКС) під час сезонного відбору газу із підземних сховищ газу (ПСГ) в систему магістральних газопроводів та закачування газу в ПСГ у літній період формування запасів газу [5].

Відомо [5], що сезон відбору газу з ПСГ із застосуванням ГПА починається, коли пластовий тиск стає недостатнім для подавання газу в магістральний трубопровід внаслідок перепаду тисків “самопливом”. У цьому випадку вводять в експлуатацію одну або декілька ДКС для забезпечення достатньої об’ємної продуктивності та тиску природного газу в трубопровідній системі. Під час відбору газу з ПСГ режим роботи ДКС характеризується безперервним зменшенням тиску на вході в компресорні агрегати. Це призводить до того, що підвищується їхня потужність і, як наслідок, втрачається газодинамічна стійкість роботи ВН, як одна з основних умов їхньої надійності. Саме цей режим нестійкості, що носить назву “помпаж”, викликає інтенсивні коливання газу в системі, які здатні довести до аварії або до значного зменшення надійності ресурсу турбомашин.

Для явища помпажу характерні [5] зміни параметрів потоку газу на лопатях робочого колеса ВН. Внаслідок цього зі збільшенням опору мережі робоча точка ВН пересувається за характеристикою вліво до межі помпажу.

Робочому колесу ВН недостатньо енергії для проштовхування газу в трубопровід нагнітача і кількість газу зменшуватиметься. Водночас на окремих лопатях робочого колеса газу починається зривання потоку газу, що призводить до пульсації газу у цьому потоці, які відповідні передпомпажним коливанням.

При цьому частота передпомпажних коливань збігається з частотою коливань газу в стаціонарному режимі роботи ВН, що призводить до появи резонансу, за якого навіть безмежно мала за величиною збурювальна сила спричиняє значне збільшення амплітуди коливань інфразвукових частот < 16 Гц. Проте, якщо тривалість передпомпажного стану ВН вираховується десятками хвилин, то перехід до зони помпажу відбувається за долі секунди. Якщо збільшується кількість зривних зон потоку газу, то ними охоплюється більше лопатей, які працюють. У цьому випадку зривні зони виходять за межі робочого колеса ВН і досягають дифузора та конфузора ВН. Тоді задіюються об’єми газу як в ділянці робочого колеса, так і у самому ВН, а коливання в

потоці газу досягають 50 % і мають гармонійний характер. Цей режим роботи ВН називають “м’який помпаж”.

Подальший розвиток і збільшення зривних зон призводить до охоплення ближніх областей обв’язки ВН, частота коливань збільшується, а їхня потужність зростає. При цьому форма коливань наближається до гармонійних в зоні інфразвукових частот, виявити які можна тільки за допомогою спецобладнання. Загроза м’якого помпажу полягає у тому, що спочатку змін у параметрах ВН не відбувається, але через деякий час роботи нагнітача у такому режимі ВН може розігрітись до такого стану, що спалахне [5]. Тому потрібні випереджувальні дії щодо захисту ВН.

Якщо перекачуються великі об’єми газу, що обумовлюють різке збільшення потужності коливань, тоді хвильовий потік охоплює не тільки ВН і його контур, але й магістраль з боку всмоктування, або нагнітання і ВН може увійти в режим “жорсткого” помпажу [5]. При цьому виникають механічні коливання (вібрування), що стають джерелом звуку, який складається не тільки із шумів вихорових та турбулентних потоків газу і повітря, але й з шуму вібрувальних підшипників, корпусу ВН, трубопроводів обв’язки, тобто всієї системи ДКС, на вібрування якої передається енергія хвильового потоку газу. Проте, на відміну від “м’якого” помпажу пружні хвилі, що при цьому створюються, перебувають не в зоні інфразвукових частот, а в зоні ультразвукових частот. Тому поряд з іншими використовують ще й акустичні способи контролю передпомпажного стану ВН [5].

Сучасний рівень розвитку автоматизації процесів керування ГПА і математичного забезпечення дозволяють у режимі on-line визначати координати робочої точки характеристики відцентрового нагнітача відносно лінії межі помпажу і здійснювати ефективний антипомпажний захист, який враховує як зміну складу газу, так і динаміку наближення робочої точки до межі помпажу (рис 1.3.) [5].

Можливість розрахунку в реальному часі дозволяє мінімізувати необхідний запас на регулювання ($L_{уст}$), тобто максимально розширити область

допустимих робочих точок характеристики ВН без відкриття байпасної арматури, забезпечуючи при цьому високий ККД ГПА без зниження рівня безпеки. Складність алгоритмів захисту і керування, необхідність проведення обчислень із циклом 10 мс, підвищені вимоги до надійності приводять до необхідності використання обладнання відомих західних фірм, таких як Allen-Bradley, Rockwell-Automation, Compressor Controls Corporation [3].

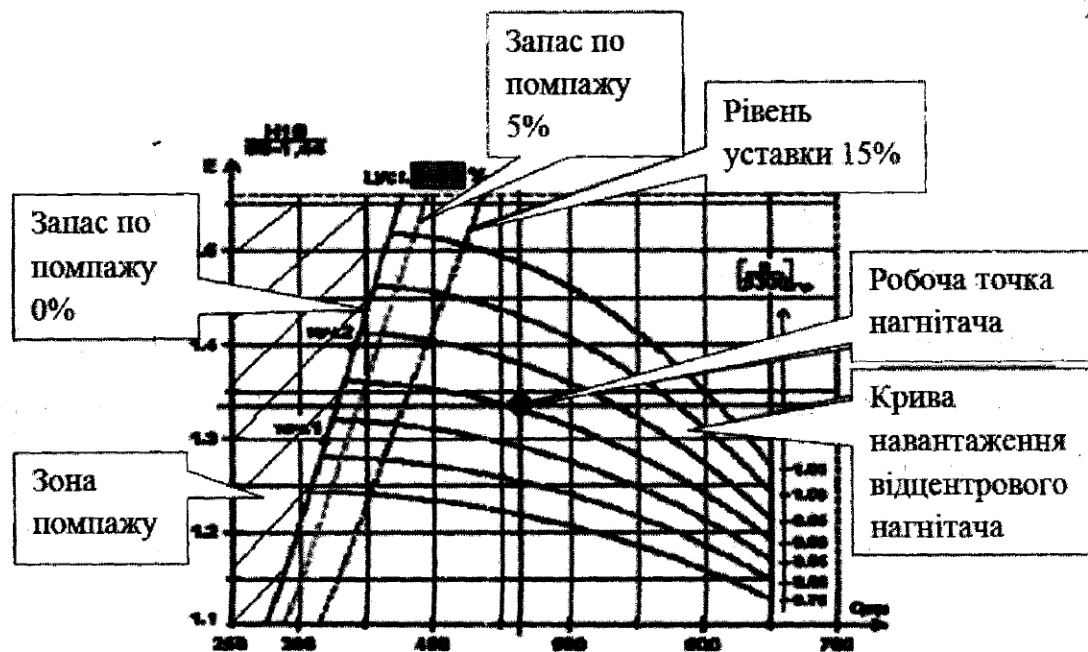


Рис. 1.3. Помпажні характеристики відцентрового нагнітача Н-16/56-1,44 ГПА № 9 ДКС “Більче-Волиця” УМГ “Львівтрансгаз”: точ. 1, точ. 2 – точки спрацювання системи антипомпажного захисту; E – ступінь підвищення тиску газу; $Q_{пр}$ – приведена об’ємна витрата нагнітача; n – частота обертання нагнітача

Проте велика кількість ГПА на ДКС, складність міжцехових комунікацій та експлуатації компресорів потребують вирішення такого важливого завдання як досягнення найбільш енергетично вигідного режиму роботи ГПА – режиму з найвищим ККД, що перебуває практично в передпомпажній зоні роботи відцентрового нагнітача. Отже, виникає необхідність забезпечення стабільної роботи ВН і контролювання переміщення його робочої точки поблизу границі помпажної зони. Робоча точка ВН може бути виведена у зону нестійкої роботи

внаслідок зміни споживання газу, параметрів газового потоку (температури, густини, газової сталої, показників політропи і адіабати, ступеня стисливості), властивостей навколишнього середовища (температури, атмосферного тиску та ін.), технічного стану ГПА взагалом. Ці зміни можуть вивести із рівноваги систему “відцентровий нагнітач ГПА – сусідні ГПА - трубопровід”, що призводить до аварії. Найбільш вагомою причиною зміни стійкості системи є явище помпажу, яке характеризується зміною параметрів потоку газу на лопатях робочого колеса ВН. Зі збільшенням опору робоча точка ВН переміщується на витрато-напірній характеристиці вліво до межі помпажу [7]. У цьому випадку енергії потоку газу, що передається робочим колесом ВН, стає недостатньою для передачі газу в трубопровід. Тому на окремих лопатях робочого колеса відбувається зрив потоку газу, що призводить до виникнення пульсації газу, які відповідають передпомпажним коливанням.

Параметри цих коливань співрозмірні з параметрами коливань газу у стійкій зоні роботи ВН. Слід відзначити, що передпомпажний режим може тривати десятки хвилин, але перехід до зони помпажу відбувається за долі секунд. Тому САК ГПА має миттєво реагувати на виникнення передпомпажних коливань та здійснювати захисні функції з попередженням явища помпажу у ВН [7].

Виявленню явища помпажу присвячено досить велику кількість публікацій [8÷11 та ін.], але запропоновані в них методи виявлення порушення стійкості не завжди забезпечують необхідну точність у визначенні межі переходу і типу нестійкості. Особливо це стосується явища помпажу в ВН ДКС ПСГ.

1.2. Аналізування методів визначення моментів входу робочої точки відцентрового нагнітача в зону помпажу

Відомо [6], що одним із найбільш оптимальних режимів роботи КС є режим, за якого забезпечується максимальне завантаження агрегатів, коли

робочі точки витратно-напірних характеристик ВН розміщені поблизу межі помпажної зони.

Отже, найбільш енергетично вигідним режимом є режим з найвищим ККД ГПА, що перебуває практично в передпомпажній зоні. Разом з тим за такого режиму необхідно забезпечити стабільну роботу ВН і не дати робочій точці переміститися в зону помпажу. Таке завдання необхідно вирішувати за допомогою системи антипомпажного захисту, що має забезпечити надійну роботу ВН поблизу межі помпажної зони [10].

Помпаж є одним з найнебезпечніших та підступних режимів роботи ВН, а для ГПА великої потужності (4-25 МВт) він може стати руйнівним. З виникненням помпажу ВН та двигун можуть бути пошкоджені. Вартість їхнього відновлення вимірюють обсязі витрат на капітальний ремонт або їхню заміну, тому наявність надійних систем антипомпажних захистів є найважливішим завданням автоматизації КС, оскільки збитки від помпажу тривалістю 3-5 хв становлять майже 70 тис. доларів на один агрегат [10].

Аналізування літературних джерел [6÷16 та ін.] показує, що існує кілька методів визначення моменту входу робочої точки в зону помпажу. Загалом можна поділити на дві групи – першу, що визначається за витратно-напірними характеристиками ВН (так званий “класичний” метод), та другу, що ґрунтується на виявленні коливань у проточній частині ВН, що характерні для передпомпажних і помпажних явищ.

Перша група методів оснований на непрямих методах розрахунку визначення меж помпажу. Їхня сутність полягає в тому, що розраховується положення робочої точки ВН на основі паспортних витратно-напірних характеристик ВН з прив'язкою до паспортної лінії границі помпажу. Далі тим або іншим способом розраховують необхідний запас за приведеною витратою до межі помпажу та визначають лінію захисту від помпажу. Потім значення величин відлаштованої лінії вводять у пристрій захисту (регулювання) від помпажу, чим запобігають переходу робочої точки ВН в зону небезпечних режимів, не допускаючи тим самим виникнення помпажу [10]. Разом із тим

численні дослідження [6÷16 та ін.] підтвердили, що точка входу в зону помпажу, як і робоча точка ВН, постійно переміщується не тільки по відношенню одна стосовно одної, але і стосовно цього значення налагоджуваної лінії захисту від помпажу. Відзначимо, що часто виникають режими, коли точка входу в зону помпажу знаходиться ближче до робочої точки, ніж налагоджувальна лінія захисту від помпажу. Тому для запобігання аваріям, що пов'язані з помпажем, експлуатаційний персонал вимушений переналагоджувати захисну лінію. Як правило, її починають відсувати вправо по характеристиці далі від межі зони помпажу, що змушує також зміщувати робочу точку ВН. Тому зменшення якості розрахунку положення робочої точки ВН призводять до подальшого зміщення налагоджуваної захисної лінії. Це зміщення, або по-іншому “запас із помпажу”, фактично може досягати 20 – 40 % [10]. Такий необґрунтований запас по помпажу продовжує використовуватись на нових агрегатах, що призводить до перевитрати паливного газу.

Загальновідомо, що підвищення ККД газотурбінних установок (ГТУ) навіть на 1 % потребує колосальних матеріальних та інтелектуальних витрат з боку розробників і виробників ГТУ. Отже, застосування “класичного” способу захисту від помпажу не дає змоги в повному обсязі отримати ефект від використання вискоефективних ГТУ при експлуатації та реконструкції КС [3, 4, 10].

Проте визначення межі зони помпажу за витратно-напірними характеристиками експериментальним шляхом прийнято світовою практикою. Наприклад, спеціалісти “Рургаз” (Німеччина) знімають помпажні характеристики кожного ВН два рази на рік. Це свідчить про те, що точка входу в помпаж — величина змінна. Тому робочу точку ВН підводять до межі помпажних коливань і фіксують значення витрати Q і ступеня підвищення тиску газу E . Таким чином, шляхом кількох замірів при різних режимах роботи ВН визначають межі помпажної зони.

При розрахунках значень межі помпажу більшість розробників [3, 4, 10÷13] антипомпажних систем враховують багато параметрів. При цьому ускладнюються математичні обчислювання і збільшується кількість складових, що застосовуються в розрахунках контрольованих значень, внаслідок чого збільшується похибка обчислень через прийняті допущення в розрахунках.

Основними недоліками застосування “класичного” методу визначення меж помпажу в сучасних умовах в [10] визначено такі (рис. 1.4).

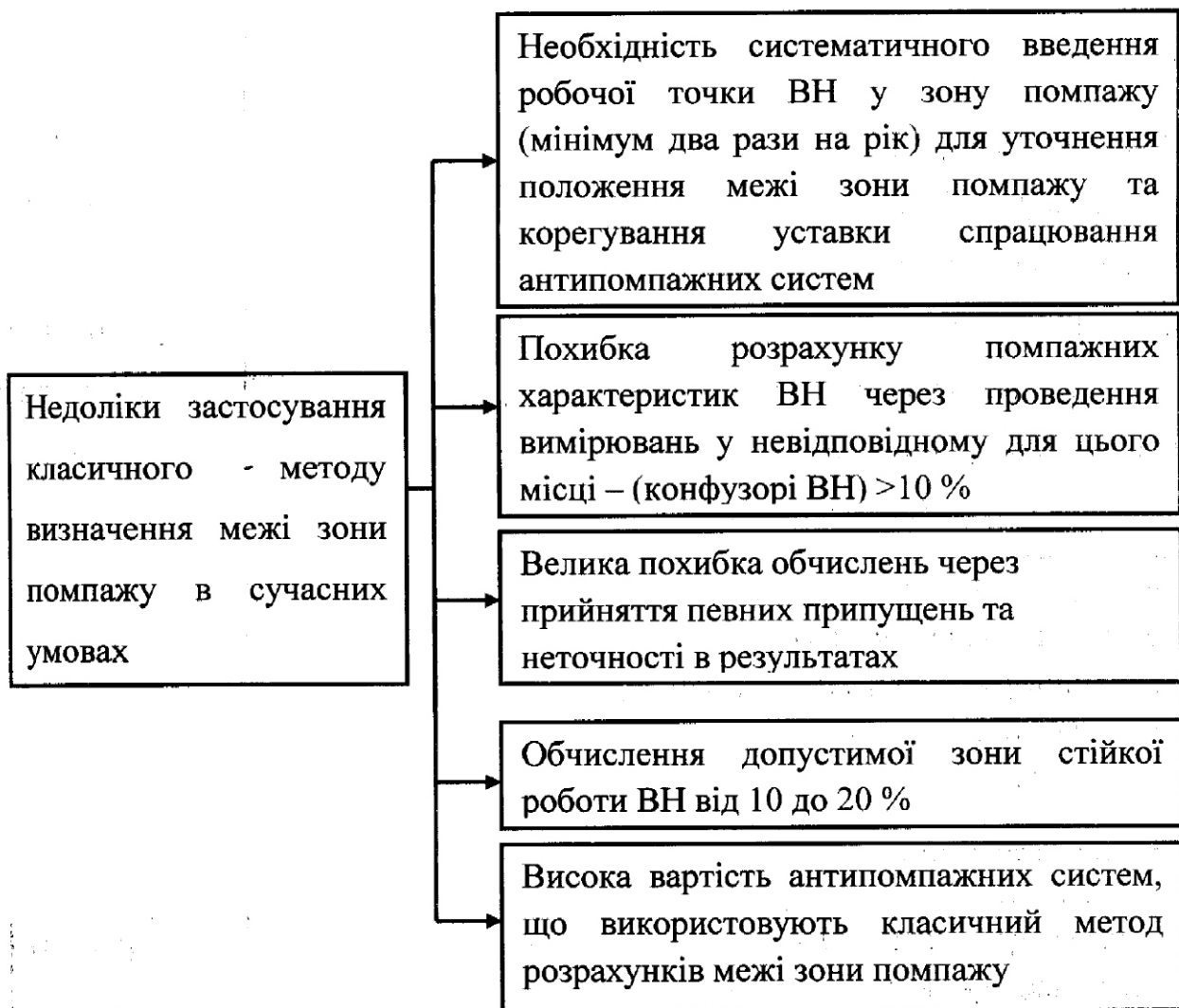


Рис. 1.4. Основні недоліки застосування “класичного” методу визначення межі зони помпажу в сучасних умовах

З часом характеристики ВН змінюються і результати, визначені непрямыми методами, отримують додаткову похибку, що впливає на результат

розрахунку запасу із помпажу, і в свою чергу, на прийняття рішень оперативним персоналом ГПА та на роботу антипомпажної системи.

Друга група методів основана на виявленні коливань у проточній частині ВН. Їх називають прямими методами [3, 10, 15, 17 та ін.]. Суть цих методів полягає у вимірюванні пульсації перепаду тиску на конфузори та інших параметрів.

При аналізі коливань газового потоку у ВН є можливість визначити дійсну межу зони помпажу і розширити роботу області ВН до межі передпомпажної зони [15].

Перевагою цього методу є його масовість, оскільки не потрібно конкретних характеристик за типами ВН, та незалежність від точності вимірювань перепаду тиску на конфузори, оскільки основною є динаміка зміни параметра.

Недоліками, на думку автора [17] є те, що використовуючи тільки прямий метод, оперативний персонал КС, за умови роботи ГПА на значній відстані від помпажної зони, не може бачити поступового наближення до неї. Окрім цього, недоліком є і те, що помпаж визначається лише за зміною одного параметра, що не забезпечує потрібну швидкодію і надійний захист від помпажу.

У роботі [4] запропоновано використання динамічного методу захисту компресорів від помпажу за комплексом показників роботи ГПА, отриманих у реальному часі, що в поєднанні з швидкодійними антипомпажними клапанами і сучасною цифровою технікою сприяє вирішенню цієї проблеми.

Запропоновано використати ідентифікацію передпомпажного стану в компресорі ДКС ПСГ шляхом виявлення потоку коливань у проточній частині через динаміку зміни комплексу показників роботи ГПА.

Математичну модель ВН ГПА представлено у вигляді системи диференціальних рівнянь, де в початковий момент часу задаються Q_0 та P_m [7]:

$$\begin{cases} \frac{dQ_0}{dt} = \frac{P_0 f(Q_0) - P_{ma}}{\rho_0 \left(\frac{l_1}{s_1} f(Q_0) + \frac{0.5l_2}{s_2} \right)}, \\ \frac{dP_m}{dt} = (Q_0 - R_{R0}) \frac{\rho_0 c_0^2}{0.5l_2 s_2} \left(\frac{P_{la}}{P_{na}} \right)^{\frac{1-\gamma}{\gamma}} \end{cases} \quad (1.3)$$

де Q_0 – об’ємна продуктивність за ВН,

P_0 – тиск на вході,

P_{ma} – абсолютний тиск газу перед мережею,

ρ_0 – густина газу у вхідному трубопроводі ВН,

s_1, l_1 – площа перерізу і довжина вхідного трубопроводу,

s_2, l_2 – площа перерізу і довжина вихідного трубопроводу,

Q_{R0} – продуктивність ВН, що дорівнює

$$Q_{R0} = \frac{Q_R \rho_1}{\rho_0},$$

де Q_R – продуктивність ВН через мережу, віднесена до параметрів на вході.

Система рівнянь (1.3) дала змогу визначити необхідні інформативні параметри, що характеризують явище помпажу у ВН: продуктивність і тиск.

Невирішеною частиною проблеми є створення методу і системи антипомпажного захисту, яка б поєднувала переваги кожного з методів. Розв’язання цієї проблеми пов’язане з необхідністю комплексного оброблення інформації, яка надходить одночасно від великої кількості датчиків. Тому необхідно розглянути методи, використовувані у світовій практиці для виявлення ознак помпажу і формування інформативних параметрів.

1.3. Способи виявлення ознак помпажу компресорів і формування інформативних сигналів

Аналізування літературних джерел [11-13, 18, 19-24 та ін.] показало, що дискретний сигнал, який показує початок фізичного помпажу компресора, використовується в системах антипомпажного захисту для ініціювання спрацювання захисту. Чим швидше та надійніше формується сигнал помпажу на основі перших ознак початку цього явища, тим ефективніше здійснюється антипомпажний захист компресора. При цьому під надійністю розуміють те, що сигнал помпажу має формуватися лише внаслідок початку помпажу, але не має бути хибним, тобто викликаними режимними перемиканнями компресора, збуреннями з боку газопроводу або завадами в вимірювальних каналах [19]. Швидке формування сигналу помпажу приводить до зменшення часу перебування компресора у помпажі і до збільшення тривалості експлуатації компресора. Використовують різні способи для своєчасного виявлення ознак помпажу, що починається, а також формування сигналу помпажу.

Відомі способи формування сигналу помпажу, такі як:

- виявлення перевищення від'ємної похідної за часом від різниці тисків нагнітання і всмоктування компресора над заданим значенням уставок [20];
- виявлення одночасного перевищення порогових значень від'ємної похідної за часом від перепаду тиску на конфузори компресора і додаткової похідної від частоти обертання ротора [21];
- виявлення одночасного перевищення похідних за часом від тиску нагнітання, витрати газу і частоти обертання ротора компресора над заданим значенням уставки [22].

Спільним недоліком цих способів є те, що область їхнього використання обмежується колом компресорів і умов їхнього експлуатації, для початку помпажу яких зазначені зміни є типовими. Проте для інших компресорів та умов їхньої експлуатації вони не можуть бути використані. Наприклад, спосіб, викладений в [20], не може бути використаний для компресорів з атмосферним всмоктуванням, а спосіб [22] – для компресорів з електроприводом.

Окрім цього, відомо [19], що характерні зміни контрольованих параметрів, визначених у [20÷22], відбуваються не завжди одночасно, а періоди

і фази, помпажних коливань різних параметрів не завжди однакові. Тому збіги за часом характерних змін параметрів може спостерігатися не під час першого помпажного коливання, а тільки з часом, що негативно відбивається на швидкодії способу формування сигналу помпажу.

Відзначимо, що спосіб, описаний в [21], важко реалізувати внаслідок суттєвого впливу високочастотних завад, що пов'язані з турбулентністю потоку і особливостями вимірювання перепаду тиску на конфузори. Наявність пульсацій може призвести під час стійкої роботи компресора до появи хибного сигналу про перевищення похідної від цього параметра свого порогового значення, тобто до зменшення надійності цього способу. Цей недолік стосується способу, описаного в [22].

Фірма “Compressor Controls Corporation” використовує спосіб формування сигналу помпажу компресора, коли з пороговими значеннями порівнюють до двох похідних за часом будь-яких параметрів: перепаду тиску на місцевому опорі у вхідному або вихідному трубопроводі компресора, тиску нагнітання і потужності, що споживає компресор [21]. Сигнал помпажу формується, коли будь-яка із двох похідних вибраних параметрів досягає свого порогового значення. Сигнал помпажу в цьому способі формується під час першої характерної зміни параметрів, що позитивно впливає на швидкодію. Недоліком цього способу є низька завадостійкість, тобто можливість хибного формування сигналу помпажу при різноманітних технологічних перемиканнях і змінах режиму даного або працюючого разом на спільну мережу компресора, які викликають досить інтенсивну зміну будь-якого одного із контрольованих параметрів [19].

Відомий спосіб [23] формування сигналу помпажу за одночасної наявності двох сигналів, першим з яких є затриманий сигнал перевищення над уставкою від'ємної похідної за часом від тиску нагнітання, а другим – сигнал перевищення над уставкою додатної за часом від частоти обертання ротора компресора. Формування сигналу помпажу за наявності характерних змін не одного параметра, а вибраної сукупності параметрів, що більш повно

характеризує початок помпажу, збільшує завадостійкість способу. Проте цей спосіб, як і описаний в [19÷22], не є універсальним, а сфера його застосування є обмеженою.

Під час помпажу компресорів з електричним приводом зміна частоти обертання ротора не спостерігається. Окрім цього, під час помпажу деяких компресорів спостерігається інтенсивне зростання частоти обертання, і тільки потім відбувається “провал” тиску нагнітання. В останньому випадку формування сигналу помпажу відбувається не під час першого помпажного коливання, а лише з плином часу, що негативно впливає на швидкодію і ефективність антипомпажного захисту, оснований на використанні дискретного сигналу помпажу [19].

У роботі [19] запропоновано розширити області застосування способів, викладених у [20, 22]. Для цього у відомому способі формування сигналу помпажу, що передбачає вимірювання характерних параметрів, обчислення похідних за часом від цих параметрів, порівняння поточних значень похідних зі своїми пороговими значеннями за величиною ознаки, вироблення дискретних сигналів про перевищення будь-якої похідної свого порогового значення затримують вироблені дискретні сигнали на заданий час і формують сигнал помпажу за одночасної наявності двох і більше затриманих дискретних сигналів про перевищення похідними від параметрів своїх порогових значень.

При цьому для адаптування запропонованого методу до різних компресорів, їхніх приводів і умов експлуатування з пороговими значеннями порівнюють усі або деякі з похідних.

Проте вибрані параметри мають бути вимірюваними з достатньою швидкістю, а у вимірюваному каналі не має бути високочастотних завад, що перешкоджають операції диференціювання. Окрім цього, вибрані параметри мають чітко характеризувати початок помпажу, а не будь-яких технологічних або режимних змін.

Інформацію про інші способи виявлення помпажу, а також їхні недоліки наведено в таблиці 1.1 (додаток 1). У таблиці також надана інформація про кількість контрольованих параметрів, що характеризують явище помпажу.

Ще одним прикладом є структурна схема системи (рис. 1.5), що реалізує спосіб захисту компресора від помпажу, викладений в [26].

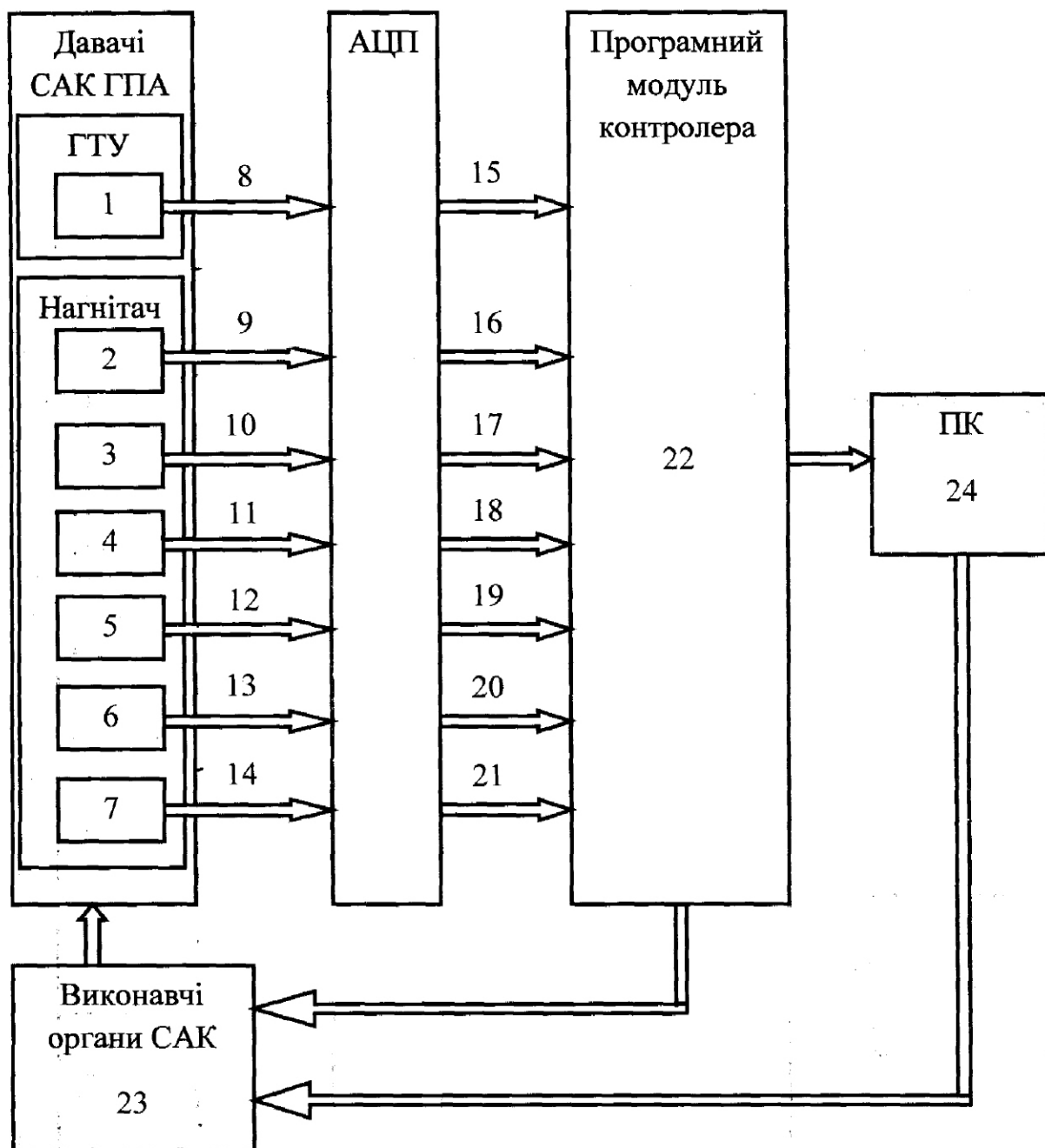


Рис. 1.5. Структурна схема системи захисту від помпажу, викладена в [26]

Група давачів, встановлених на газотурбінній установці, що забезпечують вимірювання технологічних параметрів роботи компресора, включає: 1 – давач

швидкості обертання силової турбіни газотурбінного приводу і відповідно нагнітача; 2 – давач перепаду тиску газу на конфузори нагнітача; 3 – давач вібропереміщення горизонтального опори нагнітача; 4 – давач вібропереміщення вертикального задньої опори нагнітача; 5 – давач вібропереміщення горизонтального передньої опори нагнітача; 6 – давач вібропереміщення вертикального передньої опори нагнітача; 7 – давач осьового зсуву нагнітача. Вихід кожного давача з'єднаний з відповідними блоками АЦП, 8, 7, 10, 11, 12, 13, 14, де вихідні сигнали кожного давача перетворюються у цифрову форму і надходять у програмний модуль 22 контролера, кожен по індивідуальному каналу, 15, 16, 17, 18, 19, 20, 21 відповідно [26].

Після алгоритмічного оброблення у програмному модулі контролера 22 кожного з сигналів сформований сигнал знаходить у САК 23. Одночасно сигнали з 22 надходять у ПК 24, де забезпечується візуальний нагляд оператора за формуванням сигналів за кожним параметром про наявність помпажу в компресорі.

Даний спосіб захисту компресора від помпажу реалізується таким чином [26].

З виходу давача 1 на відповідній вхід 8 АЦП надходить сигнал про поточне значення швидкості обертання силової турбіни газотурбінного приводу і нагнітача, з виходу 2 давача надходить сигнал на канал АЦП 9, з давача 3 – на канал АЦП – 10, з давача 4 – вібропереміщення вертикального задньої опори нагнітача – на канал АЦП – 11, з давача 5 – на канал АЦП – 12, з давача 6 – на канал АЦП – 13, з давача 7 – на канал АЦП 14. Сигнали з усіх давачів, перетворені у відповідних каналах АЦП в цифрову форму, надходять кожен по відповідному каналу до програмного модуля контролера 22, де здійснюється алгоритмічна обробка кожного з сигналів по індивідуальному каналу 15, 16, 17, 18, 19, 20, 21 відповідно, забезпечуючи миттєве порівняння поточного, щойно прийнятого значення з попередніми, що надійшли до контролерного стеку програмного модуля за певний проміжок часу.

На підставі даних, що надійшли від кожного давача, програмний модуль контролера визначає середнє значення відповідного параметра за цей проміжок часу. Кожне наступне поточне значення відповідного параметра, що надходить до програмного модуля від кожного давача по індивідуальному каналу, спочатку порівнюється зі середнім значенням, яке обчислене внаслідок обробки стеку за параметром і після цього заноситься до таблиці стеку. Це нове усереднене значення використовується алгоритмом для обрахування наступного чергового в такті значення параметра. Занесені до таблиці стеку результати обробки з кожного параметра застосовують для визначення коефіцієнта параметра $K_{\text{парам}}$ як співвідношення C усередненого значення окремого параметра в таблиці стеку до поточного значення контрольованого параметра від давача “знач.вхід”:

$$K_{\text{парам}} = \frac{C}{\text{"знач.вхід."}}$$

Отже, обчислений коефіцієнт кожного параметра визначає ступінь відхилення нового вхідного значення контрольованого параметра від давача, до усередненого значення, обчисленого внаслідок оброблення стекової таблиці.

Отримані таким чином значення коефіцієнтів $K_{\text{парам}}$ з кожного контрольованого параметра заносяться в алгоритм оброблення програмного модуля контролера як ознаки виникнення помпажного стану в нагнітачі. Перевищення окремих, встановлених в алгоритмі порівняння меж порогових значень кожного $K_{\text{парам}}$ класифікується алгоритмом як ознака наявності помпажних коливань за конкретним параметром і фіксується підняттям сигнальної мітки з ознакою ступеню перевищення. Умовно мітки класифікуються на три рівні і виводяться алгоритмом “формування ознаки якості помпажу за параметром” як передпомпажний стан, стан “м’якого” помпажу, або “жорсткий” помпаж.

При виникненні мітки з ознакою помпажних коливань за параметром, певна мітка фіксується алгоритмом і заноситься до оперативної таблиці запам’ятовування міток на час $T_{\text{стек}}$ таймер. При виникненні не менше ніж

чотирьох міток із ознакою наявності помпажних відхилень, формується сигнал про наявність помпажу в компресорі ГПА, який подається на виконавчі органи САК 23. Внаслідок впливу на режим агрегату виконавчими органами, відбувається стабілізація режиму роботи ГПА та віддалення від помпажної зони нагнітача, що призводить до зняття алгоритмом міток з ознакою наявності помпажних відхилень. Одночасно сигнал надходить з 22 на ПК 24, де здійснюється візуальний нагляд за формуванням сигналів за кожним параметром про наявність помпажу в компресорі.

Аналізування методів виявлення помпажу викладених у [3-5; 7, 8, 10÷26], показало, що для вирішення цього завдання використовується велика кількість параметрів і відповідно кількість вимірювальних каналів та пристроїв оброблення інформації. Цю проблему розглядають науковці різних країн [26÷55] з позиції спрощення методів оброблення інформації, підвищення швидкодії і ефективності методів моніторингу та діагностування технічного стану машин і обладнання. Одним із них є методи об'єднання (злиття, сплаву) даних (data fusion), який застосовують під час моніторингу стану газових турбін, газотурбінного компресора, авіаційних двигунів [27÷28] та ін. об'єктів. Для їх реалізації розроблено декілька міжнародних стандартів [27, 39, 40]: ISO/DIS 12274, ISO/CD 13373, ISO/FDIS 13380, ISO/DIS 14830, ISO 13373-1, ISO 13373-2, ISO/DIS 13381-1, ISO/DIS 13381-2, що являють собою концентровані знання великої групи міжнародних експертів з питань моніторингу стану, який охоплює різноманітні дисципліни: механічні вимірювання [41], електричні вимірювання [42-44], вимірювання продуктивності [45-47], трибологію [48] і неруйнівний контроль [49,50].

Типовий потік для діагностики несправностей і прогнозування складається з таких етапів [52]:

- перетворення даних в інформацію;
- перетворення інформацію в дію;
- управління архівними даними.

Іноді умови роботи агрегату змінюються так сильно, що параметри, які використовувалися для моніторингу стану і діагностики або прогнозування несправностей, також можуть істотно змінитися.

Успішний моніторинг стану ГПА і діагностики явища помпажу в основному спирається на методах обробки сигналів. Відповідні параметри мають бути ідентифіковані із сигналів, перш ніж вони можуть бути потрібні для використання. Для передбачення або прогнозування цілі, критерій для визначення характерного параметра має бути передбачуваним. Це означає, що параметр має бути монотонно зростальним або спадальним [57]. Якщо отримано кількість параметрів, то методи вибору параметрів слід використати для визначення найбільш ефективних параметрів для полегшення процесу діагностування помпажу.

1.4. Вибір методу та аналіз проблем, що виникають під час розроблення системи антипомпажного захисту компресорів ДКС ПСГ

З урахуванням недоліків і переваг розглянутих методів захисту компресорів від помпажу у роботі вибрано метод злиття даних (data fusion) для підвищення ефективності виявлення явища помпажу в ГПА на основі максимального використання інформативних ресурсів САК ГПА. З урахуванням цього сформульовано вимоги до автоматичного захисту ВН ГПА ДКС ПСГ від помпажу.

Підсистема антипомпажного захисту повинна має забезпечена давачами та антипомпажним клапаном, до яких висувають такі вимоги:

- основна приведена похибка давачів, яка використовується для розрахунку віддаленості робочої точки ВН від межі помпажу, має бути не більше 0,1 %;
- час повного переміщення АПК при стрибкоподібній зміні сигналу керування від 0 до 100 % має бути не більше ніж 2 с;

- для контролю працездатності АПК він має комплектуватися позиціонером, що формує сигнал зворотнього зв'язку про положення робочого органа антипомпажного клапана;

- має бути забезпечений вибухозахист.

До складу АПР має входити програмне забезпечення, що дозволяє автоматично реєструвати параметри процесу регулювання, надавати доступ до поточних значень параметрів або ретроданих із пульта керування САК ГПА. Архівування даних має здійснюватися автоматично з виникненням критичних режимів або за командою оператора САК ГПА.

Окрім цього, АПР повинен мати систему самодіагностування [58], яка забезпечує перевірку функціонування технічних засобів та програмного забезпечення АПР, коректність вхідних сигналів та працездатність АПК. Результат самодіагностування має передаватися в САК ГПА. Експлуатаційна документація на АПР повинна мати вказівки про дії експлуатаційного персоналу при виявленні відмов у вузлах АПР, АПК або в давачах антипомпажної системи. У разі зникнення вхідних сигналів, використовуваних для визначення віддаленості робочої точки ВН, АПР має сформувати відповідний сигнал у САК ГПА. При цьому, якщо в момент зникнення вхідного сигналу рециркуляція через АПК була відсутня, то сигнал керування АПР не має змінюватися. За наявності рециркуляції в момент зникнення вхідного сигналу АПР має відкрити АПК на мінімально-необхідну величину, що виключає можливість появи помпажу. Згідно з підвищеними вимогами до достовірності сигналу “помпаж”, вимірювальні сигнали АПР, використовувані для ідентифікації помпажу, необхідно дублювати.

Система має також запобігати розвитку помпажних коливань у разі регламентованих або аварійних порушень режиму роботи компресорних цехів одним із наступних способів залежно від величини та швидкості виниклих збурень, а також значення уставки віддаленості робочої точки ВН від межі помпажу шляхами:

- запобігання потраплянню ГПА у помпаж;

- виведення ГПА з помпажу протягом інтервалу часу, що не перевищує 2 с (ГПА з малоінерційними ГТУ судового або авіаційного типу), або до початку другого циклу коливань;

- формування сигналу в САК ГПА “Вимога аварійної зупинки (АЗ)” при ідентифікації неусувного помпажу.

Нижче наведено перелік можливих порушень режиму роботи КЦ та реакцій системи на них [58, 59]:

- порушення, які компенсуються системою АПР шляхом запобігання помпажу;

- порушення, компенсовані системою АПР шляхом виведення агрегатів з помпажу;

- порушення, компенсовані системою АПР шляхом видавання в САК ГПА сигналу “Вимога АЗ” після ідентифікації неусувного помпажу.

Якщо при порушеннях режиму роботи КЦ технологічне обладнання не дозволяє забезпечити необхідні для безпомпажної роботи агрегату умови, а випереджувальне регулювання не забезпечує виведення агрегату в стаціонарний режим перекачування газу – система АПР видає в САК ГПА сигнал “Вимога АЗ” (аварійної зупинки) після ідентифікації неусувного помпажу.

Сформульовані вимоги до антипомпажного захисту ВН ГПА сприятимуть безаварійній роботі ВН ГПА компресорного цеху підземного сховища газу.

1.5. Теоретичне обґрунтування методу злиття даних для виявлення явища помпажу у відцентрових нагнітачах ГПА

Задача виявлення явища помпажу у ВН ГПА є однією з підзадач загальної проблеми антипомпажного керування КС, зокрема ДКС ПСГ, що мають

забезпечувати високу надійність функціонування єдиної системи газопостачання України [60].

Дослідження із захисту компресорів від помпажу проводили багато вітчизняних і зарубіжних вчених [3,61]: Акульшин Ю. Д., Баллок Р. О., Веселовський В. Г., Городецький О. В., Гуренко В. М., Жаров Ю. Б., Журавльов Ю. І., Ізмайлов Р. І., Казакевич В. В., Караджі Р. Г., Крутіков Т. Е., Семенцов Г. Н., T. Downer, I. R. Baher, E. O. King, I. F. Kuhlberg, H. Pearson, D. E. Sheppard та ін. Аналітичний огляд цих робіт показав, що у розробках і промислових реалізаціях систем автоматичного керування ГПА в Україні досягнуто позитивні результати [61]. З розвитком комп'ютерних технологій з'явилась можливість оброблення більшої кількості інформації, тому застосування новітніх методів для аналізу даних можуть покращити існуючі системи антипомпажного захисту. Останнім часом набули поширення методи злиття даних серед методів, призначених для опрацювання інформації у різних галузях. Вони були висвітлені багатьма зарубіжними вченими, такими як: Varshney P. K., Byington C. S., Городецький В. І., Самойлов В. В., Xiaofeng Liu та іншими [62-64].

Для вирішення проблеми ефективного використання великої кількості даних про помпаж проаналізуємо сучасні методи обробки інформації на основі злиття отриманих даних про досліджуваний процес.

Метою злиття даних є створення удосконаленої моделі або системи з набором даних від незалежних джерел [65]. Технологія злиття здатна впоратися з проблемою неповноти інформації та невизначеності.

Найбільш поширені методи злиття даних є злиття ваг [62], метод Демпстера-Шафера [63], ШНМ, фільтр Калмана [65], нечіткий інтеграл та адаптивна нейро-нечітка система виводу.

З усіх методів злиття даних, злиття ваг є, мабуть, найбільш широко використовуваним через свою простоту. Він генерує об'єднані рішення шляхом поєднання виходів з різних незалежних джерел інформації, яким встановлюється вага.

Метод злиття ваг можна описати формулою [64]:

$$y(j) = \sum_{i=1}^n w_{ij} x(i, j), \quad (1.4)$$

де $y(j)$ - об'єднаний результат для об'єкта j ;

i - кількість джерел інформації, $\forall i = 1 : n$;

j - кількість об'єктів, $\forall j = 1 : m$;

$x(i, j)$ - результат спостереження з джерела інформації i об'єкта j .

w_{ij} - вага джерела інформації i для об'єкта j :

$$\sum_{i=1}^n w_i = 1. \quad (1.5)$$

Для визначення ваги використовується апріорне припущення про надійність джерела інформації. Відзначимо, що для реалізації цього методу можуть бути використані експертні знання. У разі, якщо такі знання недоступні, однакову надійність і довіру можна віднести до кожного джерела інформації. Це припущення зводить метод злиття ваг до більш простого злиття голосів, де кожне джерело інформації має те ж саме «право» голосу.

Одним із основних недоліків методу злиття ваг є те, що він не розглядає взаємодію між джерелами інформації. Метод злиття ваг припускає, що кожне джерело інформації не залежить від інших джерел інформації. Це припущення може обмежити ефективне використання цього методу. Іншим недоліком є те, що у багатьох випадках ваги для джерел інформації визначаються експертними знаннями, які можуть бути суб'єктивними. У результаті точність злиття даних може бути знижена.

Метод Демпстера-Шафера розглядається як узагальнена Байєсівська теорія [63]. Теорія очевидності Демпстера-Шафера може показувати неточність і невизначеність задачі, шляхом введення двох функцій: правдоподібності і довіри, обидві з яких є похідними від функції маси імовірності. За спостереженням давача, і ймовірність можливих несправностей "А" може бути описана за допомогою довірчого інтервалу:

$$[Belief(A)_i, Plausibility(A)_i], \quad (1.6)$$

де $Belief(A)_i$ – функція довіри, що являє собою міру достовірності даних давача і про несправність “ A ” (гіпотеза A);

$Plausibility(A)_i$ – функція правдоподібності, що означає величину максимального значення довіри до гіпотези A .

Нижньою межею довірчого інтервалу є рівень довіри:

$$Belief_i(A) = \sum_{B \subseteq A} m_i(B), \quad (1.7)$$

де $m_i(B)$ – довіра по всіх підмножинах A ;

$B \subseteq A$ – будь-яка непорожня множина, що належить множині A .

Верхня межа довірчого інтервалу – це правдоподібність, що враховує всі зауваження, які не виключають помилку “ A ”. Правдоподібність описується так:

$$Plausibility(A)_i = 1 - Belief_i(\bar{A}) = \sum_{B \cap A \neq \emptyset} m_i(B), \quad (1.8)$$

де \bar{A} – доповнення до гіпотези, міра сумніву щодо гіпотези A ;

$B \cap A \neq \emptyset$ – усі непорожні підмножини, що перетинають множину A .

Одна із основних проблем теорії очевидності Демпстера-Шафера є визначення функції маси ймовірності, оскільки функції правдоподібності й функції довіри є похідними від функції маси ймовірності. У деяких випадках, функція мас ймовірності визначається з емпіричних знань і знань відповідної галузі.

Отже, недоліком методу Демпстера-Шафера є складність визначення функції маси ймовірності.

Штучні нейронні мережі (ШНМ) є ще одним методом злиття даних, що часто використовується [64,66], завдяки їхній можливості розпізнавання образів і здатності розпізнавати нечіткі і неточні сигнали.

ШНМ мають особливості, завдяки яким ШНМ можна застосовувати в сфері синтезу інформації і діагностування несправностей, а саме:

- мають змогу отримувати нові знання. Процес навчання здійснюється через безперервну регуляцію цінностей ваги серед нейронів;
- можуть бути системою з багатьма входами/виходами. Ця структура показує, що нейронна мережа може обробляти складні численні проблеми об'єкта керування;
- обробляють інформацію паралельним способом. Ця особливість свідчить, що нейронні мережі можуть об'єднувати інформацію з різних джерел одночасно і природно;
- мають добрі показники відмовостійкості;
- є одними з найкращих у апроксимації функцій. Багатошарова мережа прямої дії, наприклад, може апроксимувати будь-яку нелінійну функцію з будь-якою точністю, а також може бути використана для інтерполяції.

Для подальшого покращення ефективності використання ШНМ для злиття даних було запропоновано ансамбль штучних нейронних мереж [67]. Дослідження підтвердили, що ансамбль працює краще, ніж окремі мережі. Аналогічний висновок був зроблений і шляхом злиття різних ШНМ із методом нечіткої логіки [68].

Хоча ШНМ знайшли успішне застосування в злитті даних, теоретичний аналіз і реальні випадки їх використання показують, що вони мають недоліки.

По-перше, успішне застосування ШНМ багато в чому залежить від підготовки даних. Якщо навчальні дані є неповними або недостатніми, то ШНМ не можуть добре працювати.

По-друге, нейронна мережа являє собою систему "чорного ящика". Цей недолік може обмежити його застосування.

Фільтр Калмана є одним із широко застосовуваних методів оцінювання стану об'єктів. Основна ідея фільтру Калмана полягає у використанні рівняння динаміки системи, тобто рівняння, що пов'язує параметри стану в різні моменти часу і використовується як додаткова інформація, подібно до того, як рівняння фізичних зв'язків між різними параметрами використовуються при статистичному оцінюванні стану. Саме термін "фільтр" характеризує

призначення цього підходу як способу відокремлення корисної інформації із зашумлених сигналів.

Фільтр Калмана успішно використовується для передбачення різких збоїв в роторних машинах [65]. Цей метод може бути використаний також для оцінювання технічного стану системи в реальному часі, оскільки різкі зміни в оцінюванні помилки можуть бути використані як попередження для різних несправностей обладнання.

Фільтр Калмана є різновидом лінійного оптимального алгоритму і підходить для лінійних динамічних систем. Проте у більшості випадків системи мають нелінійні характеристики і традиційний лінійний алгоритм може не дати задовільного результату.

Нечіткі міри і нечіткі інтеграли мають деякі важливі властивості - вони можуть відображати важливість критеріїв та представляють певні взаємодії між критеріями. Ці властивості роблять нечіткі міри та нечіткі інтеграли найбільш раціональними для вибору функції і механізмів контролю стану та діагностики несправностей обладнання [68].

Аналіз літературних джерел [64,58] довів, що нечіткі інтеграли (Сугено і Шоку) мають особливі властивості, що підходять для безлічі критеріїв злиття даних:

- інтеграли Сугено і Шоку є ідемпотентними (тобто повторна дія над об'єктом не змінює його), безперервними, монотонно неспадними операторами;
- інтеграл Шоку щодо до адитивної міри μ збігається з середньозваженим арифметичним, де ваги $w_i \in \mu(\{x_i\})$;
- інтеграл Шоку є стійким при позитивних лінійних перетвореннях. Інтеграл Сугено не має цієї властивості, але він задовольняє аналогічну властивість з \min і \max заміною вибірки і суми. Інтеграл Шоку підходить для основної агрегації, в той час як інтеграл Сугено, більше підходить для порядкової агрегації;

– інтеграли Сугено і Шоку містять всі порядкові статистичні характеристики, зокрема \min ., \max . і середнє.

Недоліком нечіткого інтегралу є складність визначення нечіткої міри.

Адаптивна нейро-нечітка система виводу (Adaptive-Network-Based Fuzzy Inference System). Така система має, порівняно з іншими методами, високу швидкість навчання, простоту алгоритму та оптимальну опрацьованість програмного забезпечення в системі математичного моделювання MatLab і показує більш точні результати прогнозування багатьох галузях науки і виробництва [71].

ANFIS є одним із перших варіантів гібридних нейро-нечітких мереж — нейронної мережі прямого поширення сигналу особливого типу, запропонована Янгом [72].

ANFIS реалізує систему нечіткого висновку Сугено у вигляді п'ятишарової нейронної мережі прямого поширення сигналу.

Призначення шарів таке: перший шар - терми входних змінних; другий шар – антецеденти (посилки) нечітких правил; третій шар – нормалізація ступенів виконання правил; четвертий шар – висновку правил; п'ятий шар – агрегування результату, отриманого за різними правилами [73].

Отже, кожний шар в ANFIS реалізують окремий етап нечіткого висновку [72]. Введемо такі позначення: x_1, x_2, \dots, x_n - входи мережі; y – вихід мережі. Припустимо, що база правил складається з двох нечітких “якщо-то” правил типу Такагі – Сугено [74]

Правило 1: Якщо $x \in A_1$ та $y \in B_1$, то $f_1 = p_1x + q_1y + r_1$.

Правило 2: Якщо $x \in A_2$ та $y \in B_2$, то $f_2 = p_2x + q_2y + r_2$.

Шар 1: виконує функцію введення нечіткості. Кожен вузол в цьому шарі є вузлом з функцією активування:

$$O_i^1(x) = \mu_{A_i}(x), \quad (1.09)$$

де x – є входом у вузол i ,

A_i – лінгвістична змінна (пов'язана з функцією вузла).

Іншими словами, O_i^1 є функцією належності до A_i і визначає ступінь, з яким x належить цьому квантору A_i .

Зазвичай вибирають $\mu_{A_i}(x)$ із максимумом, рівним 1, і мінімумом, що дорівнює 0. Для цього підходить дзвоноподібна функція належності:

$$\mu_{A_i}(x) = \frac{1}{1 + \left[\left(\frac{x - c_i}{a_i} \right)^2 \right]^{b_i}}. \quad (1.10)$$

де $\{a_i, b_i, c_i\}$ – це набір параметрів. У зв'язку зі зміною цих параметрів, функція теж змінюється відповідним чином, представляючи різні форми функцій належності лінгвістичних змінних A_i .

Параметри цього шару називають параметрами передумови.

Шар 2: нейрони цього шару виконують множення вхідних сигналів і представляють собою вагу правила:

$$w_i = \prod_{j=1}^m \mu_{A_{ij}}(x), \quad (1.11)$$

де m – кількість вхідних сигналів (тобто нечітких правил).

Шар 3: визначається i -й нейрон, що обчислює відношення ваги i -го правила до суми ваг усіх правил:

$$\overline{w}_i = \frac{w_i}{\sum_{i=1}^m w_i}. \quad (1.12)$$

Шар 4: виконується функція активування нейронів за формулою:

$$O_i^4 = \overline{w}_i f_i = \overline{w}_i (p_i x + q_i y + r_i), \quad (1.13)$$

де \overline{w}_i – вихід шару 3,

$\{p_i, q_i, r_i\}$ - параметри правил Такагі-Сугено 1-го порядку.

Шар 5: єдиний нейрон даного шару обчислює загальний вихід як суму вхідних сигналів:

$$O_i^5 = output = \sum \overline{w}_i f_i = \frac{\sum w_i f_i}{\sum w_i}. \quad (1.14)$$

Адаптивними шарами є перший і четвертий шари, в яких відбувається корегування параметрів функцій належності і параметри нечітких правил відповідно.

Отже, застосування методу багатопараметричного злиття даних на основі ANFIS може покращити продуктивність системи оцінювання поточних значень в декількох напрямках, таких як точність, надійність і робастність [75]. Перенесення цієї технології для виявлення явища помпажу у ВН ГПА ДКС ПСГ, безумовно, підвищить можливості системи антипомпажного захисту та їхню швидкодію.

Тому стає доцільною розроблення методу антипомпажного захисту ВН ГПА на основі злиття даних за допомогою ANFIS.

1.6. Вибір та обґрунтування напрямку проведення досліджень

Аналізування об'єкта досліджень, а також методів та технічних засобів антипомпажного захисту компресорів від помпажу показало, що існує кілька методів визначення моменту входу робочої точки ВН в зону помпажу, які загалом можна поділити на дві групи. Перша – це методи, що дозволяють визначити моменти входу робочої точки нагнітача в зону помпажу за витрато-напірними характеристиками цього нагнітача. Це так звані класичні методи. Друга група методів ґрунтується на виявленні коливань у проточній частині нагнітача, що характерні для передпомпажних та помпажних явищ. Для виявлення помпажа компресора, який характеризується низькочастотними коливаннями, використовують поточну інформацію про динаміку зміни контрольованих параметрів, порівняно з пороговими значеннями, а також про похідні першого та другого порядку від контрольованих параметрів і про їхній знак.

Недоліками методів першої групи є:

- значна похибка під час розрахунків помпажних характеристик внаслідок проведення вимірювань на конфузорі нагнітача та через прийняті рішення;

- обмеження допустимої зони стійкої роботи нагнітача, оскільки при ближчого ніж на 10 % положення робочої точки нагнітача до межі зони помпажу відбуваються хибні спрацювання антипомпажного захисту або антипомпажного регулювання;

- необхідність систематичного введення робочої точки нагнітача в зону помпажу для уточнення положення межі помпажу та коригування уставок спрацювання антипомпажних систем регулювання і захисту;

- чим більший запас із помпажу, тим менш ефективно працює ДКС ПСГ;

- невисока надійність захисту від помпажу компресорів ДКС;

Недоліками методів другої групи є:

- недостатня швидкодія, надійність і вірогідність діагностики явища помпажу внаслідок недостатньої динаміки зміни контрольованих параметрів (наприклад, температури), і можливого перевищення контрольованого параметра над пороговим значенням у ситуаціях, не пов'язані з помпажем компресора (короткочасне теплове перегрівання турбіни внаслідок незадовільної роботи системи захисту турбіни від перегріву).

З проаналізованих методів найбільшого застосування знайшли методи першої групи як такі, що дозволяють забезпечити захист від помпажу різних ППА, є безпечними у використанні, мають широкі діапазони вимірювань.

Підвищення продуктивності методу та розширення сфери його застосування можливе шляхом автоматизації процесів автоматичного регулювання і захисту компресора ДКС ПСГ, що забезпечить потрібну надійність і швидкодію. Розв'язання цієї задачі пов'язане з необхідністю проведення подальших досліджень у напрямі вивчення властивостей об'єкта керування, удосконалення цього методу та розроблення способів підвищення швидкодії та надійності виявлення явища помпажу.

Виходячи з викладеного вище, для подальшого розвитку методу і системи антипомпажного захисту компресорів ДКС ПСГ від помпажу необхідно:

- проаналізувати методи та технічні засоби антипомпажного захисту компресорів від помпажу, вибрати та обґрунтувати напрям проведення досліджень;
- розробити методику експериментальних досліджень помпажних явищ;
- дослідити ГПА ДКС ПСГ як об'єкт антипомпажного керування, виявити вхідні і вихідні величини, сформулювати обмеження та технологічні параметри;
- формалізувати постановку задачі антипомпажного захисту, розробити методики її розв'язування та синтезувати алгоритми функціонування системи керування;
- розробити метод злиття даних та синтезувати автоматичну систему антипомпажного захисту ГПА ДКС ПСГ від помпажу на основі сучасних програмно-технічних засобів;
- провести експериментальні дослідження в експлуатаційних умовах розробленого методу злиття даних у системі антипомпажного захисту ГПА від помпажу. Результати досліджень випробувати на ДКС ПСГ “Більче-Волиця”.

Саме ці питання розглянуть в наступних розділах дисертації.

Тематиці розділу I присвячені роботи автора [60], [67], [69], [70], [75].

РОЗДІЛ 2

ТЕОРЕТИЧНЕ ОБГРУНТУВАННЯ МЕТОДУ АВТОМАТИЧНОГО АНТИПОМПАЖНОГО ЗАХИСТУ СИСТЕМИ “ВІДЦЕНТРОВИЙ НАГНІТАЧ ГАЗОПЕРЕКАЧУВАЛЬНОГО АГРЕГАТУ - ТРУБОПРОВІД” НА ЗАСАДАХ ШТУЧНОГО ІНТЕЛЕКТУ

2.1. Розроблення описової фізичної моделі у системі автоматичного керування відцентрових нагнітачів ГПА з газотурбінним приводом

Для вибору та обґрунтування напрямків удосконалення методу автоматичного антипомпажного захисту ВН ГПА з газотурбінним приводом та подальших досліджень побудуємо описову фізичну модель процесу автоматичного керування ГПА (рис. 2.1), як складним об'єктом керування, в якому одночасно відбувається декілька фізичних процесів, якими треба керувати: механічні, теплові (перетворення хімічного палива в тепло), газодинамічні (стиснення і розширення газу).

Об'єкт керування функціонує за умов невизначеності статистичної природи.

Взаємозв'язки елементів системи САК ГПА ілюструється на рис. 2.1, з якого бачимо, що компримування природного газу є сукупністю трьох взаємодіючих підсистем: механічної, теплової і газодинамічної. Режимми їхньої роботи і показники X_M, X_T, X_G залежать від керувальних впливів U_M, U_T, U_G та різноманітних збурювальних факторів Z_M, Z_T, Z_G , (технічний стан ВН, хімічний склад V_X реального транспортованого газу, температура навколишнього середовища t_c , атмосферний тиск $P_{атм}$ та ін.), які мають випадковий характер та великі динамічні можливості. Ця обставина зумовлює до створення складних динамічних процесів, що відбиваються на технологічних, енергетичних та економічних показниках роботи компресорної станції [76].



Рис. 2.1. Описова фізична модель взаємодії трьох підсистем у динамічній системі САК ГПА: U_M, U_T, U_G – керувальні впливи; X_M, X_T, X_G – показники роботи ГПА; Z_M, Z_T, Z_G – збурювальні фактори

Відзначимо, що різноманітність підсистем та їхніх елементів проявляється як у фізичній різноманітності, так і у різноманітності фізичних законів та математичних моделей, що описують процеси їхнього функціонування. Механізму взаємодії підсистем із навколишнім середовищем притаманна також різноманітність фізичної природи та математичних моделей, що описують ці взаємодії. Багатокритеріальність оцінок процесів, що відбуваються в системі компримування газу, пов'язана з тим, що ефективність кожної з підсистем оцінюється за власними критеріями, які іноді суперечливі.

Наприклад, якщо під впливом зовнішніх факторів змінився тепловий стан об'єкта керування, тоді збільшення температури відповідно підвищує тепловий перепад на турбіні, що збільшує споживану потужність турбіни, а надлишок потужності, в свою чергу, приводить до збільшення швидкості обертання ротора, що супроводжується зростанням ступеня підвищення тиску газу, який ще більше збільшує перепад температури [77].

Отже, регульовані величини у такому разі могли б зростати до небезпечних значень, якщо б не було регуляторів. Зміна хоча б одного із

регулювальних факторів оновлює картину рівномірного розподілу споживаних потрібних потужностей, після чого настає певний рівноважний усталений режим роботи ГПА.

Збільшення ступеня підвищення тиску газу до граничного помпажного стану супроводжується зростанням ККД ГПА, що є позитивним процесом, але це може призвести до аварійного режиму і тому не допускається антипомпажним регулятором і антипомпажним клапаном.

Для підвищення продуктивності і ефективності технологічного процесу компримування природного газу необхідне автоматичне регулювання усіх перелічених процесів і антипомпажний захист. При цьому вихідними параметрами системи будуть кутова швидкість обертання вала нагнітача, температура газів у камері згоряння і ступінь підвищення тиску газу. Як керуючі впливи використовують подачу палива, зміну вихідної площі реактивного сопла та поворот лопаток вхідного направляючого апарату [8, 71].

Ці питання розглядатимемо на прикладі ГПА Ц-6,3 як об'єкта керування. Він складається з таких основних систем і механізмів: ВН із системою ущільнення, газотурбінного двигуна, системи маслозабезпечення, вхідного тракту з повітрозабірними камерами, повітроочищувачами та пристроєм антизледеніння; системи обігрівання, системи вентиляції відсіків агрегату та маслбаків; систем електроживлення, пожежогасіння, виявлення загазованості, вимірювання вібрації двигуна, вібрації та осьового зсуву нагнітача; апаратури первинних перетворювачів, САК ГПА, виконавчих механізмів, кранової обв'язки двигуна та ВН (рис. 2.2.):

- кран 1 – підключення ВН до вхідного колектора КС;
- кран 2 – підключення ВН до вихідного колектора КС;
- кран 4 – продування та поступове заповнення порожнини ВН перед пуском агрегату;
- кран 5 – випуск газу на “свічку” при продуванні порожнини ВН у період пуску та в період зупину агрегату;

- кран 6 – підключення ВН до кільцевого колектора КС;
- кран 9 – випуск паливного газу на свічу з трубопроводу між краном 12 та стопорним клапаном СК у період зупину ГПА;
- кран 10 – випуск пускового газу на “свічку”;
- кран 11 – подача пускового газу;
- кран 12 – подача паливного газу.

Режим роботи ГПА – безупинний протягом 25000 годин із періодичним зовнішнім оглядом та регламентними роботами під час його зупину та ремонту.

Помпаж двигуна має контролюватися засобами системи антипомпажного захисту і давачами газотурбінного приводу, але у разі виникнення помпажу на газотурбінному приводі (ГТП), має виконуватися алгоритм аварійної зупинки цілого ГПА.

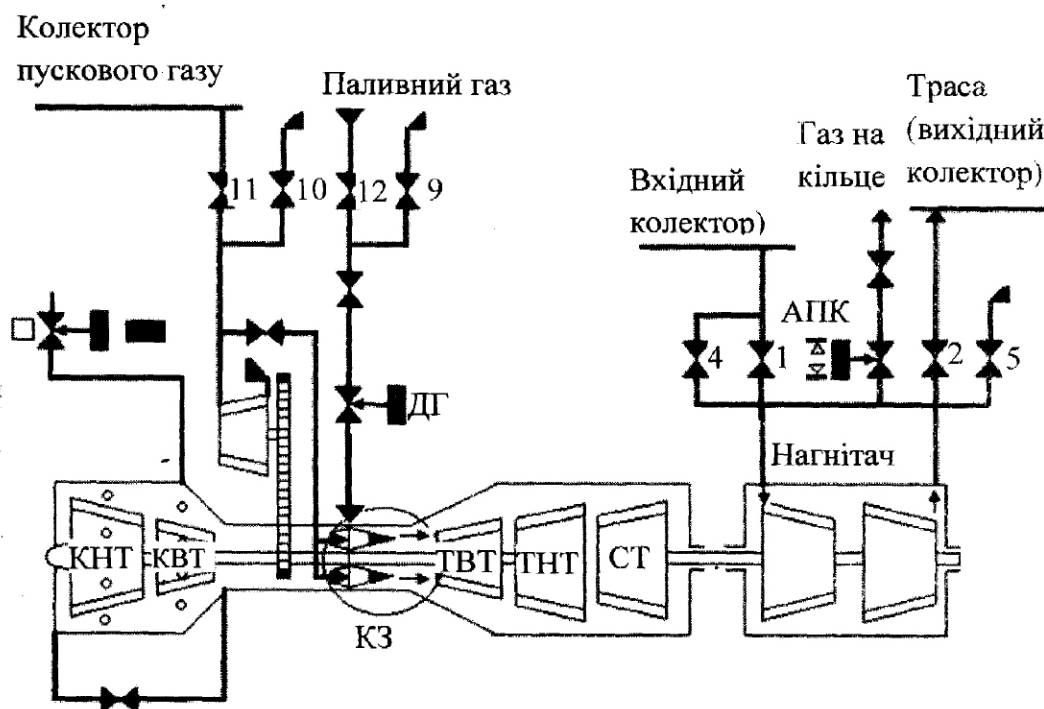


Рис. 2.2. Схема ГПА з двигуном типу Д-336-2: КЗ – камера згоряння, АПК – антипомпажний клапан, ДГ – дозатор газу, СТ – силова турбіна, ТНТ – турбіна низького тиску, ТВТ – турбіна високого тиску, КВТ – компресор високого тиску, КНТ – компресор низького тиску

Запал і горіння палива підтримується 2 пусковими форсунками, що інтегровані з агрегатами запалювання в корпусі камери згоряння.

Встановлено, що для антипомпажного захисту ГПА з газотурбінним приводом використовують два способи що наведені, на рис. 2.3.

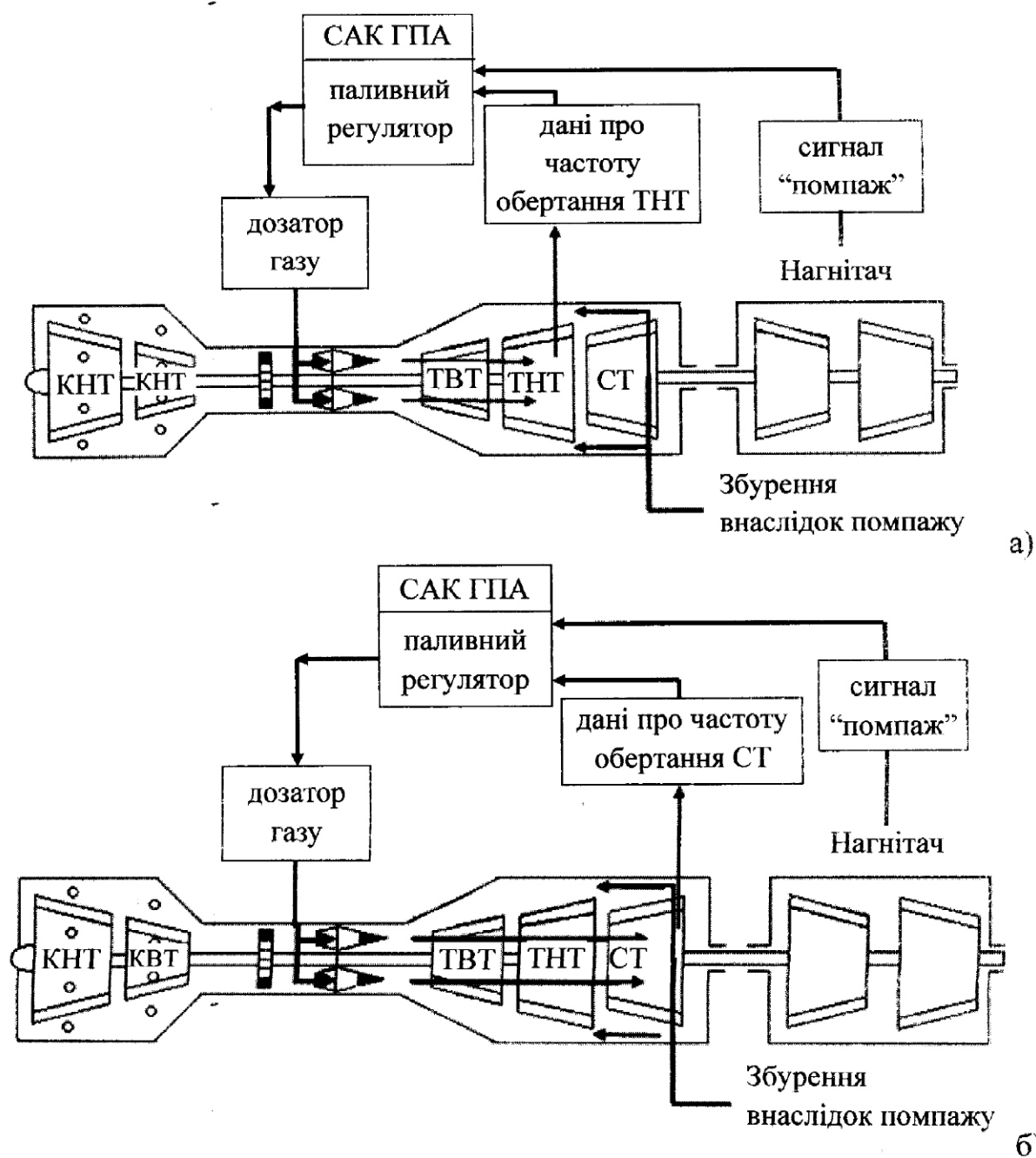


Рис. 2.3. Способи антипомпажного захисту газоперекачувальних агрегатів із газотурбінними приводами

Антипомпажний захист ВН ГПА є підзадачею загальної проблеми оптимального керування КС, зокрема ДКС ПСГ, які мають забезпечувати

високу надійність і продуктивність роботи, досягнення найбільшої ефективності функціонування єдиної системи газопостачання України.

Структуру запропонованої системи антипомпажного захисту ВН ГПА наведено на рис. 2.4 [3, 78].

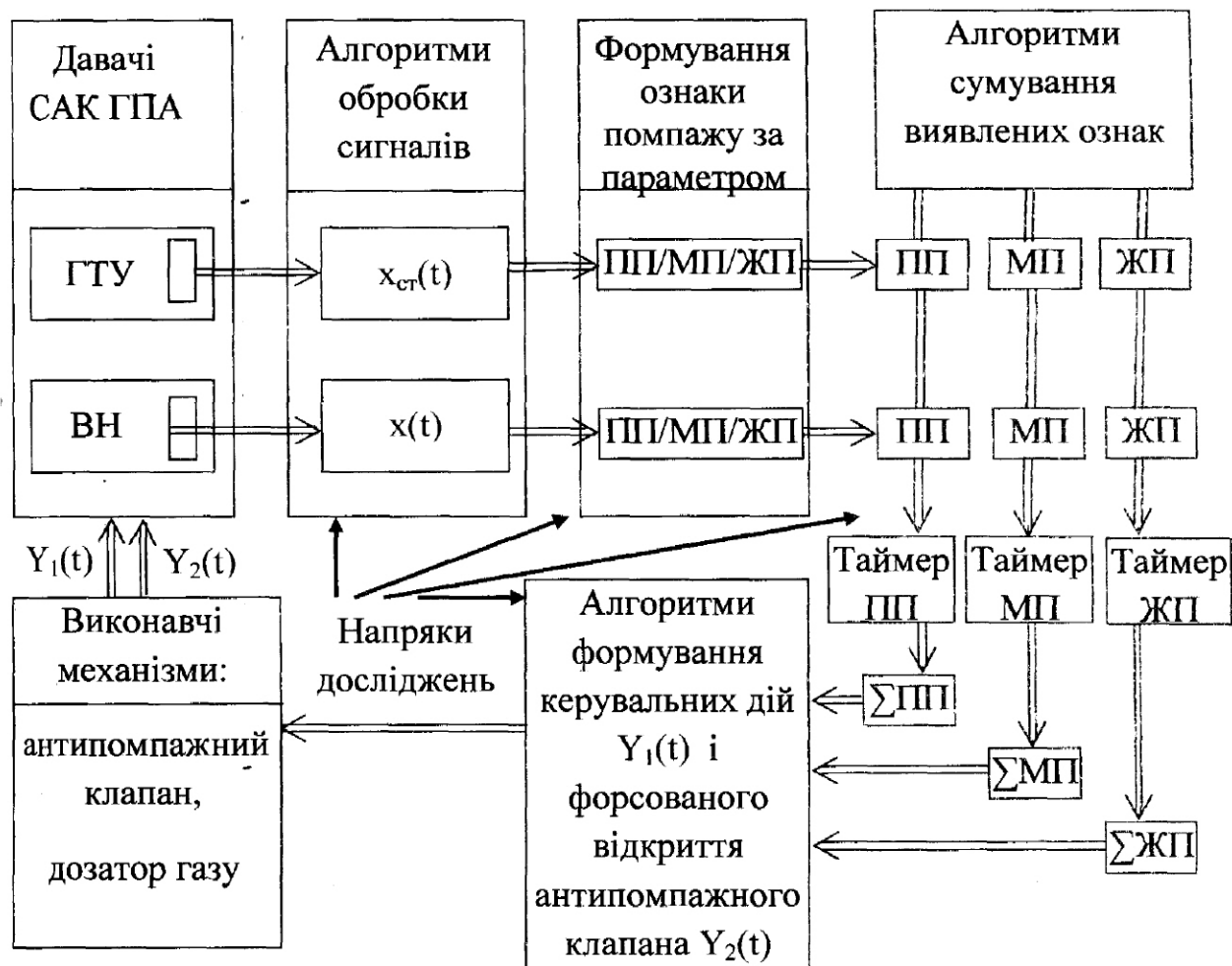


Рис. 2.4. Модель системи антипомпажного захисту ВН ГПА: ГТУ – газотурбінна установка, ПП – передпомпажний стан, МЖ – стан м'якого помпажу, ЖП – жорсткий помпаж

Антипомпажне регулювання і захист передбачають збереження безпечної відстані між робочою точкою ВН і межею його помпажу та оптимальним режимом роботи ВН ГПА. Захист здійснюється за допомогою зміни положення захисного антипомпажного клапана на необхідну величину, а регулювання – корегуванням задання регулятора швидкості обертання ВН.

Алгоритми антипомпажного регулювання реалізуються у вигляді прикладної програми PLC – контролера САК ГПА. Вони дозволяють врахувати як зміну газодинамічних умов у лініях всмоктування і нагнітання ВН, так і динаміку наближення робочої точки характеристики ВН до межі помпажу.

Другий канал, канал антипомпажного захисту, є найбільш швидкодієвими і визначає момент входження ВН в помпаж на ранніх стадіях його зародження шляхом виявлення обертального зриву, що передуює помпажу і видає сигнал $Y_2(t)$ на форсоване відкриття антипомпажного клапана для екстреного виводу ГПА із зони небезпечних режимів роботи.

Математичне забезпечення алгоритмів розпізнавання аварійних режимів ґрунтується на багатопараметричному груповому статистичному аналізі сигналів великої кількості давачів процесу компримування газу в реальному часі. При цьому кожні 10 мс слід обчислювати параметри, що характеризують ступінь нестационарності процесу, які відповідають алгоритмам розпізнавання помпажу.

Враховемо, що існуючим системам антипомпажного захисту (АПЗ) властиві певні недоліки [10, 12, 15, 16] :

- алгоритми роботи системи не враховують зміни початкових умов на всмоктуванні компресора, внаслідок чого лінія налаштування системи АПЗ потребує корегування у разі зміни температури навколишнього середовища, тиску газу на вході в нагнітач, хімічного складу реального транспортованого газу;
- системи АПЗ мають недостатню швидкодію;
- положення лінії налаштування системи АПЗ не враховує швидкість зміни характеристики мережі в напірному трубопроводі;
- немає інформації про величину запасу до помпажу і поточне положення дрослюювального елемента перепускного клапана;

- немає автоматичного переведення системи АПЗ з дистанційного режиму керування на автоматичний режим при виході робочої точки компресора на лінію налаштування системи;
- експлуатовані системи АПЗ мають обмежені функціональні і сервісні можливості.

Отже, на основі аналізу описової фізичної моделі взаємодії різних процесів у системі автоматичного керування і антипомпажного захисту ГПА встановлено, що до теперішнього часу залишається актуальною проблема антипомпажного захисту ГПА, який має забезпечувати ідентифікацію помпажу з формуванням сигналу “помпаж”, переривання виниклого помпажу шляхом формованого відкриття антипомпажного клапана (АПК) з подальшим переходом до режиму регулювання, формування сигналу “Вимога аварійної зупинки” при ідентифікації неусовного помпажу.

Керування антипомпажним клапаном може виконуватися сигналами регуляторів, що входять до складу системи антипомпажного регулювання (АПР). Сигналами АПР кожного з агрегатів групи у випадку послідовного з'єднання неповнонапорних ВН, сигналом від оператора САК ГПА, сигналом від САК компресорного цеха.

Враховуючи наведену вище характеристику описової фізичної моделі досліджуваного об'єкта, доцільно розглянути математичні основи синтезу спостерігачів за рівнем використовуваної поточної інформації.

2.2. Аналіз зв'язків між параметрами математичної моделі процесу компримування газу ГПА з газотурбінним приводом

Відомо [79], що найбільш зручним способом опису процесу компримування газу, як багатовимірної об'єкту, є використання звичайних диференціальних рівнянь. Оскільки в системі антипомпажного захисту ГПА

регулюється декілька величин, то для повного опису об'єкта керування використовуємо систему диференційних рівнянь.

Врахуємо, що об'єктом керування (ОК) (рис. 2.5) є технологічний процес компримування природного газу, в якому відбуваються складні перетворення і взаємозв'язки енергетичних та матеріальних потоків [79]. Стан такого ОК як динамічна система, характеризується декількома десятками фізичних величин – швидкостями, тисками, масовими витратами, концентраціями, зусиллями та ін.



Рис. 2.5. Структурна схема ГПА ДКС ПСГ: $\bar{z}(t)$ – вектор збурень,

$Q_{rec}(t)$ – витрата рециркуляції, ДГ – дозатор газу

Для розроблення математичної моделі такого ОК врахуємо, що стан процесу компримування газу в умовах ДКС ПСГ у кожний момент часу t з певною точністю можна характеризувати компонентами вектора основних вихідних змінних [7,81]

$$\bar{x}^T(t) = (Q_{np}(t), P_{вих}(t), E(t)), \quad (2.1)$$

де $Q_{np}(t)$ – продуктивність нагнітача,

$P_{вих}(t)$ – тиск газу на виході нагнітача,

$E(t) = \frac{P_{вих}(t)}{P_{вх}(t)}$ – ступінь підвищення тиску природного газу,

$t \in T$ – неперервний час,

T – тривалість інтервалу спостереження.

З переходом від одного миттєвого стану до іншого значення компонентів вектору вихідних змінних $\bar{x}^T(t)$ змінюються, тобто вони є характеристиками стану ОК.

На процес компримування газу впливає велика кількість зовнішніх впливів, але із усієї їхньої множини вибрали насамперед керувальні дії, які є найбільш суттєвими для розв'язання задачі антипомпажного регулювання і захисту ВН ГПА від помпажу:

$$\bar{y}^T(t) = (N_{cm}(t), Q_{ex}(t), P_{ex}(t)), \quad (2.2)$$

де $N_{cm}(t)$ – частота обертання силової турбіни;

$Q_{ex}(t)$ – об'єм газу на вході нагнітача, що надходить з виходу підземного сховища газу, або ГПА 1 ступеня;

$P_{ex}(t)$ – тиск газу на вході відцентрового нагнітача.

Враховували також, що об'єкт керування характеризується величинами $\bar{z}^T(t)$

$$\bar{z}^T(t) = (\text{полож.ДГ}, z_{завд}(t)) \quad (2.3)$$

де полож.ДГ – положення дозатора газу,

$z_{завд}(t)$ – задана оператором частота обертання ротора нагнітача та вектором збурень $\bar{f}(t)$, від яких залежать характеристики стану ОК.

Окрім цього, під впливом таких збурень як хімічний склад реального транспортованого газу, витрата рециркуляції $Q_{rec}(t)$, температура навколишнього середовища T , атмосферний тиск $P_{атм}$, технічний стан ВН та ін. компоненти векторів вхідних та вихідних параметрів процесу змінюються в часі, а кожна з вихідних величин є функцією керувальних дій $\bar{y}^T(t)$ і зовнішніх впливів $\bar{z}^T(t)$ та $\bar{f}(t)$

$$\bar{x}_i(t) = A_i(\bar{y}t, \bar{z}(t), \bar{f}(t)), \quad i = 1, 2, \dots, n. \quad (2.4)$$

де A_i – невідомі оператори, що підлягають ідентифікації,

n - кількість вихідних величин ОК.

Щодо ступеня підвищення тиску газу $E(t)$, то він визначається через параметри стану $P_{вих}(t)$ та вхідний вплив $P_{вх}(t)$

$$E(t) = A_0(P_{вих}(t), P_{вх}(t), t),$$

де A_0 – невідомий оператор, що підлягає ідентифікації.

Отже, параметри стану ОК $\bar{x}^T(t)$ і керувальні дії $\bar{y}^T(t)$ є найбільш універсальними характеристиками процесу компримування газу, що мають бути використані для розв'язання задачі антипомпажного регулювання і захисту.

Враховуючи це, алгоритм функціонування ОК представимо у вигляді системи таких рівнянь

$$\begin{aligned} Q_{np}(t) &= A_{ок_1}(N_{cm}(t), \bar{z}(t), \bar{f}(t), t), \\ P_{вих}(t) &= A_{ок_2}(Q_{вх}(t), \bar{z}(t), \bar{f}(t), t), \\ E(t) &= A_{ок_3}(P_{вх}(t), \bar{z}(t), \bar{f}(t), t), \end{aligned} \quad (2.6)$$

де $A_{ок}(\cdot)$ – перетворення, від яких залежать від типу каналу передачі впливів об'єкта керування ОК.

При постановці і розв'язанні задачі раннього виявлення відхилень процесу компримування газу від норми враховані також обмеження на змінні $\bar{x}(t)$, $\bar{y}(t)$ та $z_{завод}(t)$, які задані у вигляді умов належності векторів $\bar{x}(t)$, $\bar{y}(t)$ та $z_{завод}(t)$ до деяких замкнутих множин.

$$\begin{array}{ccc} \bar{y}(t) \in Y; & x(t) \in X; & \bar{z}_{завод}(t) \in Z_{завод}, \\ \uparrow & \uparrow & \uparrow \\ m & n & l \end{array} \quad (2.7)$$

де $Y, X, Z_{завод}$ – замкнені множини, задані відповідно в m -, n -, l -мірних просторах.

Обмеження на окремі компоненти векторів $\bar{y}(t)$, $\bar{x}(t)$, $\bar{z}_{завод}(t)$ покладені незалежно один від одного – у вигляді обмежень окремих компонентів

$$0 \leq y_i \leq y_{i_{max}}; 0 \leq x_i \leq x_{i_{max}}; 0 \leq z_{завод}^{(k)} \leq z_{завод_{max}}^{(k)}, \quad (2.8)$$

де $y_{i_{\max}}, x_{i_{\max}}, z_{\text{забод}_{\max}}^{(k)}$ – допустимі або максимально можливі значення компонентів.

Отже, досліджуваний об'єкт (рис. 2.6) є об'єктом керування з m вхідними змінними y_1, y_2, y_k, y_m і n вимірюваними вихідними змінними x_1, x_2, x_l, x_n . Кожна вхідна змінна пов'язана з кожною вихідною змінною. (На рис. 2.6 показано лише зв'язки між y_k і x_l з іншими) [82].

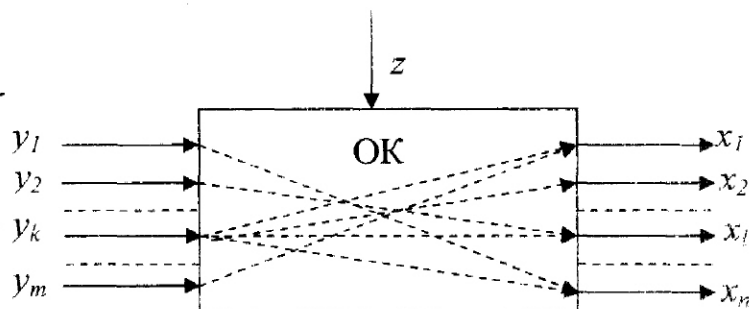


Рис. 2.6. Модель “Multi Input - Multi Output (MI-MO)” ГПА

Припустимо, що взаємозв'язки по всім каналам $y_k - x_l$ лінійні або лінеаризовані. Тоді у загалом ГПА як ОК можна описати такою системою неоднорідних диференціальних рівнянь

$$\sum_{l=1}^n D_{il}(s)x_l(t) = \sum_{k=1}^m K_{ik}(s)y_k(t); i=1,2,\dots,n, \quad (2.9)$$

де $D_{il}(s)$ і $K_{ik}(s)$ – вихідні і вхідні диференціальні оператори у вигляді степеневих поліномів.

Систему (2.9) можна записати у вигляді одного векторного диференціального рівняння

$$D(s)\bar{x}(t) = K(s)\bar{y}(t), \quad (2.10)$$

де $D(s), K(s)$ – матриці операторів,

s – оператор диференціювання,

$\bar{y}(t), \bar{x}(t)$ – вектори вхідних і вихідних змінних, що представлені у вигляді матриць стовпчиків:

$$\bar{y} = [y_1, y_2, \dots, y_k, \dots, y_m]^T,$$

$$\bar{x} = [x_1, x_2, \dots, x_l, \dots, x_n]^T,$$

де T – символ транспонування матриці,

$$D(s) = \begin{vmatrix} D_{11}(s) & \dots & D_{1n}(s) \\ \dots & \dots & \dots \\ D_{n1}(s) & \dots & D_{nn}(s) \end{vmatrix}; \quad K(s) = \begin{vmatrix} K_{11}(s) & \dots & K_{1m}(s) \\ \dots & \dots & \dots \\ K_{n1}(s) & \dots & K_{nm}(s) \end{vmatrix}. \quad (2.11)$$

Тепер можна визначити матрицю функції передачі

$$W(s) = D^{-1}(s)K(s) = \begin{vmatrix} W_{11}(s) & \dots & W_{1m}(s) \\ \dots & \dots & \dots \\ W_{n1}(s) & \dots & W_{nm}(s) \end{vmatrix}, \quad (2.12)$$

де $D^{-1}(s)$ – матриця, обернена щодо до $D(s)$.

Елементи матриці $W(s)$ – це функції передачі по окремих каналах $y_k - x_l$. Якщо у лівій частині кожного рівняння системи (2.9) міститься лише одна складова із змінною x_l , тоді функції передачі по окремих каналах можна визначити, використовуючи відоме визначення функції передачі

$$W_{lk}(s) = \frac{x_l(s)}{y_k(s)} = \frac{K_{ik}(s)}{D_{il}(s)}, \quad i = 1, 2, \dots, n. \quad (2.13)$$

Модель МІ-МО ГПА, як багатовимірний об'єкт керування наведена на рис. 2.7 [83].

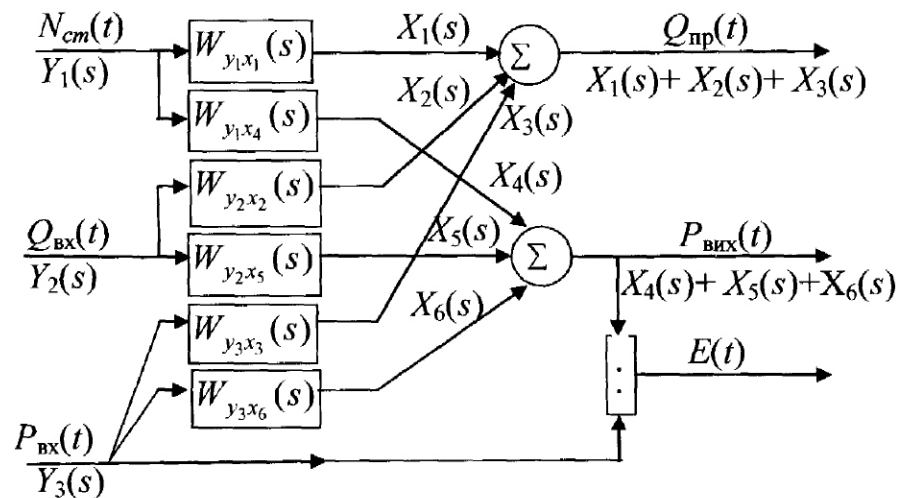


Рис. 2.7. Модель МІ-МО ГПА, як багатовимірний об'єкт

антипомпажного захисту: N_{cm} – частота обертання силової турбіни, $Q_{ex}(t)$ –

об'єм газу на вході нагнітача, що надходить із виходу підземного сховища газу, або ГПА 1 ступеня, $P_{вх}(t)$ – тиск газу на вході відцентрового нагнітача, $Q_{np}(t)$ – продуктивність нагнітача, $P_{вих}(t)$ – тиск газу на виході нагнітача, $E(t)$ – ступінь підвищення тиску газу $E(t) = P_{вих}(t) \cdot P_{вх}(t)^{-1}$; $x_l(s) - x_0(s)$ – зображення за Лапласом вихідних параметрів

Тоді згідно з принципом суперпозиції кожен вихідну змінну ВН ГПА ОК можна розглядати як суму

$$x_l(s) = \sum_{k=1}^m W_{lk}(s) y_k(s), \quad l = 1, 2, \dots, n. \quad (2.14)$$

Використовуючи матрицю передачі багатовимірної об'єкта (2.12), схему МІ-МО можна замінити еквівалентною схемою (рис. 2.8), якій відповідає операторне рівняння

$$\bar{x}(s) = W(s) \bar{y}(s) \quad (2.15)$$

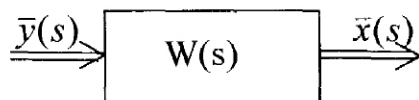


Рис. 2.8. Еквівалентна схема ГПА як багатомірного ОК

Оскільки усі вхідні впливи прикладені до ОК одночасно, в момент часу $t=0$, то можна записати [83], що

$$\bar{x}(t) = \int_0^t \bar{w}(t-\tau) \bar{y}(\tau) d\tau, \quad (2.16)$$

$$\bar{x}_l(t) = \sum_{k=1}^m \int_0^t \bar{w}_{lk}(t-\tau) \bar{y}_k(\tau) d\tau, \quad l = 1, 2, \dots, n. \quad (2.17)$$

де τ – час,

$w(t)$ – вагова функція, що однозначно визначає шукану функцію передачі

$$W(s) = \int_0^{\infty} w(t) e^{-s\tau} d\tau. \quad (2.18)$$

2.3. Постановка задачі синтезу спостерігача станів ВН ГПА за умов невизначеності

Можливості ПК у САК ГПА дозволяють накопичувати великі масиви інформації і обробляти дані вимірювань у послідовному режимі. Проте в умовах експлуатації ГПА немає інформації про функціональні залежності в таких даних та їхній розподіл, а також про зміну цих залежностей у часі і про обсяг всієї вибірки. Тому такі умови функціонування системи прийнято називати невизначеністю. За умов невизначеності гостро постає проблема підвищення швидкодії послідовності обробки технологічних даних, яку доцільно вирішувати шляхом використання гібридних мереж – штучних нейронних мереж (ШНМ) та нечіткої логіки, що мають універсальні апроксимуючі властивості і можливості навчання. Такі мережі, що використовуються для розв'язання практичних задач інтелектуального аналізу (Data Mining) в послідовному режимі, дозволяють істотно прискорити і спростити процес обробки даних.

Необхідно відзначити, що з точки зору системного підходу ГПА є складним, суттєво нелінійним, стохастично-хаотичним, багатовимірним, нестационарним динамічним об'єктом керування, що функціонує за умов апіорної та поточної невизначеності і перебуває під впливом зовнішніх завад, вимірювання яких ускладнюється недосконалістю, браком потрібних пристроїв.

Розглянемо структурну схему системи антипомпажного захисту ГПА (рис. 2.9). Розімкнена система складається із задавального, обчислювального і виконавчого пристроїв, а також об'єкта керування.

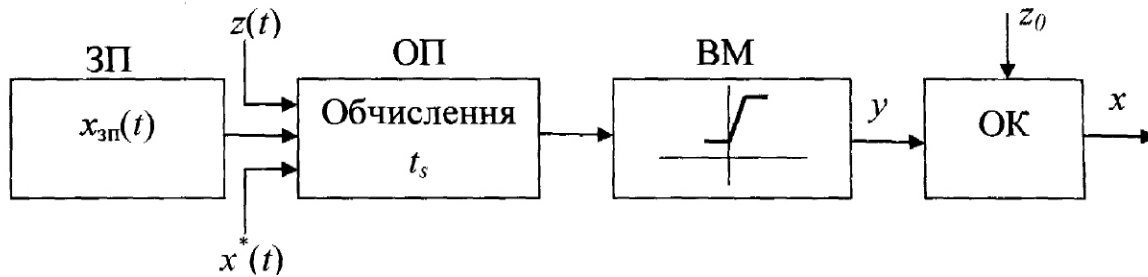


Рис. 2.9. Структура розімкнутої системи антипомпажного захисту оптимальної за швидкодією

Оскільки визначення моментів перемикання у загальному випадку є досить складною задачею, тому системи з максимальною швидкодією доцільно конструювати як замкнені [84] (рис.2. 10). Задавальний пристрій формує програму керування $x_{зп}(t)$, як функцію сигналу часу t . Обчислювальний пристрій залежно від відомих початкових умов $x(0)$ і завданням $x_{зп}(t)$, еквівалентного бажаному кінцевому стану $x_k(t)$, визначає моменти перемикання t_{pi} кожного керувального впливу y_i . Потім обчислювальний пристрій видає у визначені моменти часу t_s команди y_0 на перемикання виконавчого пристрою з одного крайнього положення в інше. Момент перемикання залежить також від збурення z , тому за його наявності керування у розімкнутої системи може бути здійснене лише у тому разі, коли збурення заздалегідь визначене як функція часу $z(t)$.

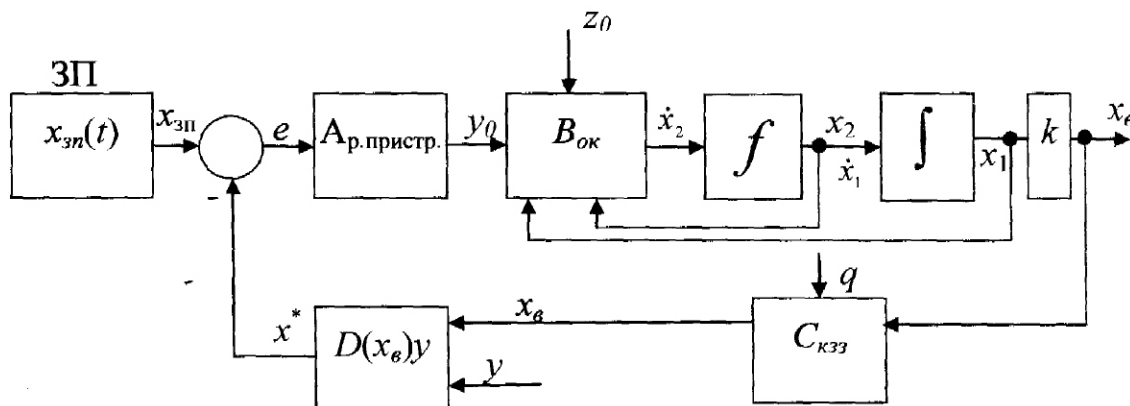


Рис. 2. 10. Структурна схема замкненої системи антипомпажного захисту системи "ВН ГПА - ТП"

Динамічну систему (рис.2. 10) можна записати рівняннями [85]:

$$\left. \begin{aligned} \dot{x}_2 &= B_{ок}(x_2, x_1, y_0, z_0, t), \\ x_0 &= C_{кзз}(x_1, q, t), \end{aligned} \right\} \quad (2.20)$$

$B_{ок}(\cdot)$ і $C_{кзз}(\cdot)$ – перетворення, від яких залежить від типів ВН ГПА, як ОК, і контуру зворотного зв'язку (КЗЗ);

y_0 – вхід об'єкта керування;

x_1, x_2 – проміжні змінні об'єкта керування;

z_0 і q – випадкові збурення, що діють на систему “ВН ГПА – ТП” та завади в контурі зворотного зв'язку, вид розподілу яких невідомий;

x_0 – вхід системи спостереження спостерігача станів;

$t \in T$ – неперервний час;

T – тривалість інтервалу спостереження.

На стан об'єкта накладено обмеження

$$x_0 \in \{x_0, x_1\}, \quad (2.21)$$

$x_0, \Pi = \overline{0,1}$ є можливим значенням змінної стану ОК (передпомпажний стан, відсутність помпажу).

При обмеженні (2.21) може бути справедлива одна із гіпотез про клас технічного стану ВН як ОК, в якому можливе явище помпажу:

$$H_{\Pi}: x_0 = (1 - \Pi)C_{кзз}(x_0, q, t) + \Pi \cdot C_{кзз}(x_1, q, t); \quad \Pi = \overline{0,1}, \quad (2.22)$$

де Π - дискретний параметр, що дорівнює нулю ($\Pi = 0$), якщо ВН ГПА перебуває в стані $x = x_0$, і $\Pi = 1$, якщо ВН ГПА перебуває в стані $x = x_1$ (передпомпаж).

Враховуючи, що ВН ГПА з газотурбінним приводом типу Ц-6,3 за експериментальними даними є об'єктом другого порядку і має функцію передачі [3]

$$W_{ок}(s) = \frac{k}{T_1 T_2 s^2 + (T_1 + T_2)s + 1},$$

алгоритмічну структуру системи автоматичного антипомпажного захисту ВН ГПА як багатовимірним об'єктом із спостереженням його станів проведемо у вигляді алгоритмічної структури САК у змінних стану (рис. 2.11) [86].

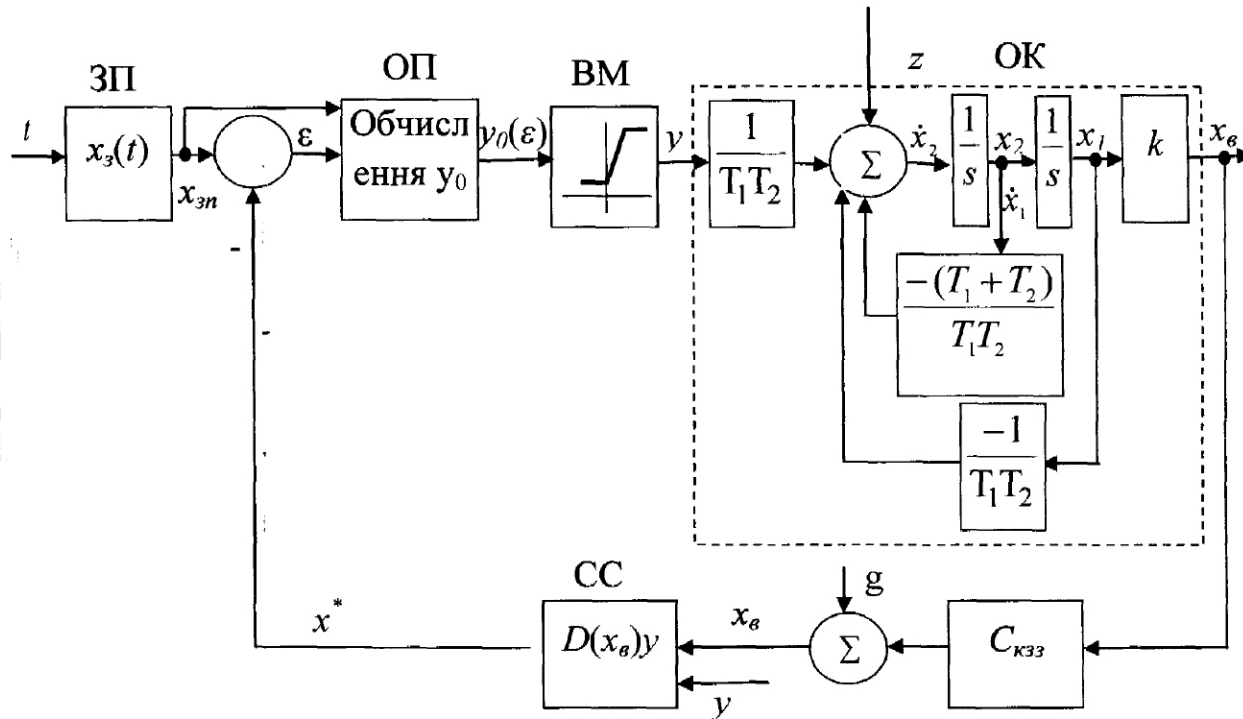


Рис. 2.11. Алгоритмічна структура системи автоматичного антипомпажного захисту ВН ГПА як багатовимірним об'єктом із спостереженням його станів у вигляді моделі у змінних стану: ЗП – задавальний пристрій; ОП – обчислювальний пристрій; ВМ – виконавчий механізм системи антипомпажного захисту; ОК – об'єкт керування; $C_{кзз}$ – перетворення, вид якого залежить від типу контуру зворотного зв'язку – системи спостереження; СС – спостерігач станів ВН ГПА $\Pi = \overline{0,1}$ (нормальний режим експлуатації ВН ГПА; помпаж)

Тому доцільним є підвищення якості інформації про явище помпажу в ВН ГПА і об'єднання її (або злиття даних, сплаву), що зумовлює підвищення надійності отриманих оцінок.

2.4. Розроблення методу антипомпажного захисту ВН ГПА на засадах адаптивної нейро-нечіткої мережі

Удосконалення інформаційного забезпечення системи автоматичного керування ГПА є важливим та актуальним завданням, оскільки збільшення рівня автоматизації газотранспортної системи, зокрема КС, має супроводжуватися підвищенням швидкодії і надійності не тільки автоматичного керування, але й автоматичного захисту ГПА КС, особливо ДКС ПСГ [27,67].

Відомі способи діагностування стану ВН ГПА нерозривно пов'язані з опрацюванням в реальному часі великої кількості контрольованих параметрів. Оскільки обсяг даних про фактичний технічний стан ГПА є досить значним і не дозволяє проаналізувати усю доступну інформацію людині-операторові самостійно, то доцільно застосовувати новітній метод злиття даних.

Процес злиття даних характеризується синтезуванням інформації на низькому та високому рівні, що включає в себе такі компоненти [87]:

- джерела інформації, такі як датчики, апріорна інформація, бази даних і знання людини;
- взаємодія людини з комп'ютером, що включає в себе запити, команди та інформацію про отримані результати та сигналізацію;
- система управління базами даних зберігає отриману інформацію і об'єднані результати.

Одним із основних питань, що виникають у процесі проектування систем, які ґрунтуються на технології злиття даних, є виявлення місця, де здійснюватиметься процес синтезування даних. Виходячи з цього критерію, можна виділити такі типи архітектур [88] :

- централізована архітектура, в якій вузол злиття даних знаходиться в центральному процесорі, що отримує інформацію від усіх джерел;

- децентралізована архітектура, яка складається з мережі вузлів в яких кожен вузол має свої власні можливості обробки інформації. Синтезування даних здійснюється автономно;
- розподілена архітектура, в якій вимірювання від кожного джерела обробляються незалежно один від одного, до того як інформація передається до вузла злиття даних;
- ієрархічна архітектура, що включає в себе поєднання децентралізованих і розподілених архітектур, створюючи ієрархічні схеми, в яких процес синтезування даних здійснюється на різних рівнях.

Загальна схема організації процедури злиття даних зображена на рис.2.12.

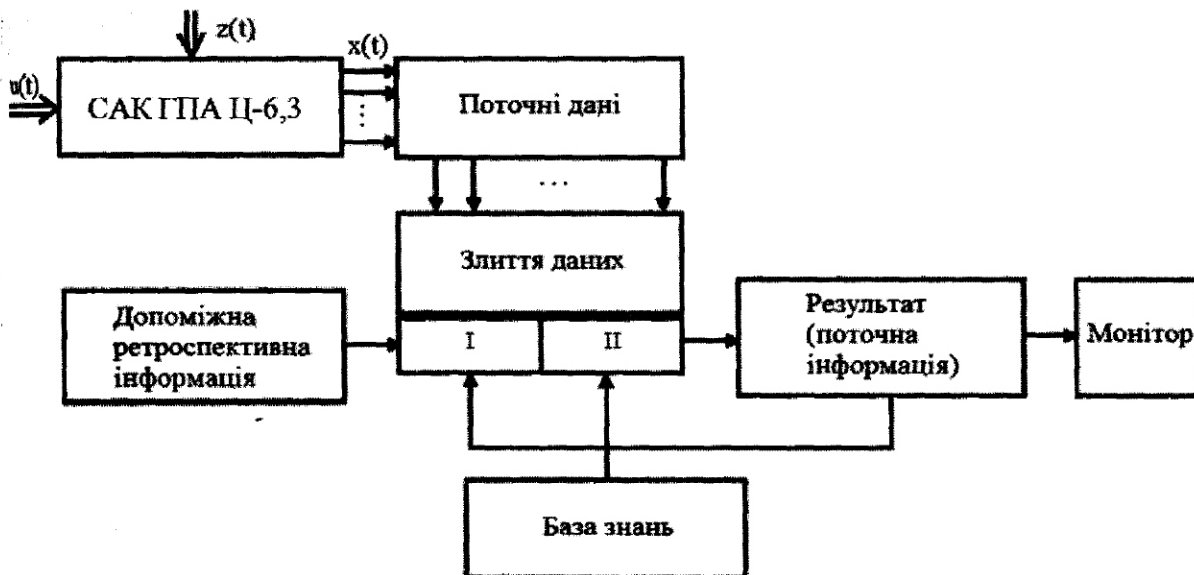


Рис.2. 12. Загальна схема організації злиття даних: $u(t)$ - керувальні дії, $z(t)$ - збурення, $x(t)$ - контрольовані параметри

Технологія злиття даних та інтелектуального аналізу даних є взаємодоповнювальними процесами, оскільки сприяють знаходженню цінної інформації. Інтелектуальний аналіз даних (Data Mining) – це дослідження і виявлення алгоритмами, засобами штучного інтелекту в “сирих даних” прихованих структур, шаблонів або залежності, які:

- раніше не були відомі;
- нетривіальні;

- практично корисні;
- доступні для інтерпретації людиною і необхідні для ухвалення рішень різних сферах діяльності [89].

Як приклад застосування методології злиття даних розглядається система автоматичного керування ГПА Ц-6,3 ДКС “Більче-Волиця”, що функціонує у взаємодії з системою керування подачею палива, швидкодієвим антипомпажним клапаном “Моквелд”, який встановлений на вихідному колекторі обв’язки нагнітача та призначений для антипомпажного регулювання захисту цього нагнітача при наближенні до помпажних явищ у режимі компримування газу [67].

Режими роботи ГПА Ц-6,3 ДКС “Більче-Волиця”:

- автоматичний пуск (АП);
- режим компримування газу (РКГ);
- холодне прокручування (ХП);
- режим нормального зупину (НЗ);
- режим аварійного зупину із стравлюванням газу з нагнітача (АЗ1);
- режим аварійного зупину без стравлюванням газу з нагнітача (АЗ2).

Узагальнена функціональна структура системи антипомпажного захисту ВН ГПА, що побудована з використанням технології злиття даних, наведена на рис. 2.13.

На рис.2.13 прийняті такі позначення:

$u(t)$ – змінні, що діють на вході ВН ГПА (керувальні дії): $N_{ст}(t)$ – частота обертання силової турбіни, пол.ДГ – положення дозатора газу, $p_{вх}(t)$ – тиск газу на вході в нагнітач, $Q_{вх}(t)$ – об’єм газу на вході;

$f(t)$ – неперервні зовнішні зміни: $z_{зовн}(t)$ – задана оператором частота обертання ротора нагнітача, $k_{помп}$ – коефіцієнт помпажу;

$x(t)$ – компоненти вектора вихідних змінних: $Q_{пр}(t)$ – продуктивність нагнітача; $p_{вих}(t)$ – тиск газу на виході нагнітача, $Q_{рец}(t)$ – витрата рециркуляції, $E = p_{вих}/p_{вх}$;

$z(t)$ – зовнішні збурення: хімічний стан реального транспортованого газу, технічний стан ВН, температура навколишнього середовища, атмосферний тиск та ін.;

$e(t) = x_3(t) - x(t)$ – відхилення (похибка).

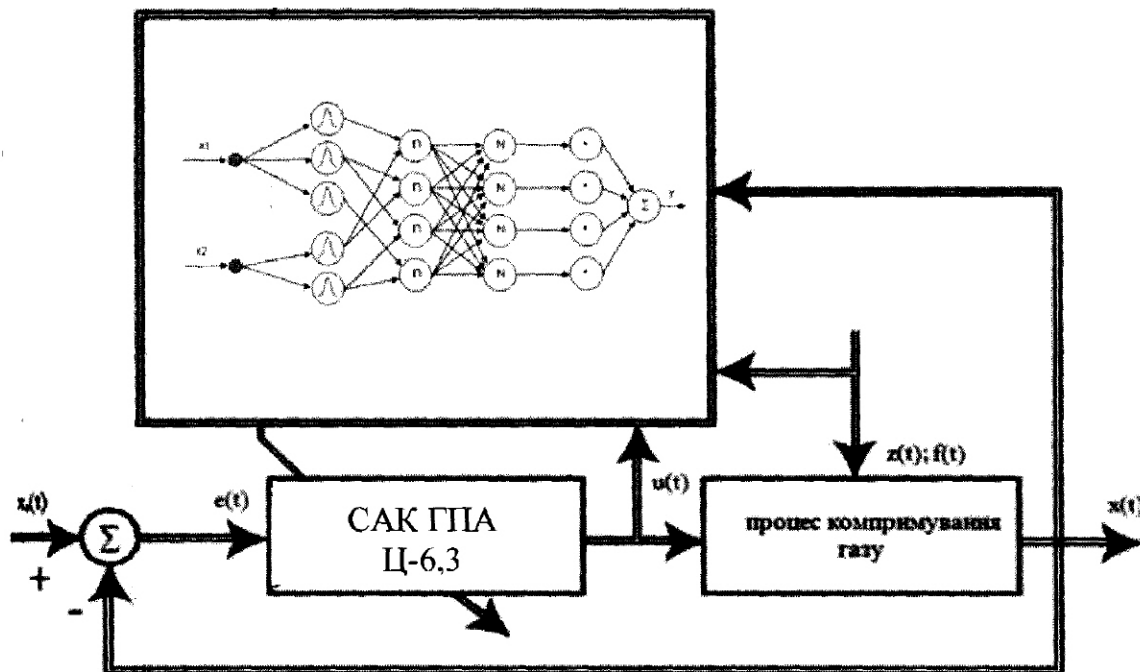


Рис. 2.13. Узагальнена функціональна структура системи антипомпажного захисту ВН ГПА

Застосування методу багатопараметричного злиття даних покращить точність діагностування технічного стану ВН ГПА. Окрім цього, така система забезпечує підвищення ефективності та оперативності керування ГПА завдяки використанню сучасних технічних засобів контролювання і керування, а також експлуатаційної готовності, стабільності та безперебійного перекачування газу шляхом запобігання помпажу та його наслідків, запобігання аварійних ситуацій, забезпечення надійної роботи ГПА.

Висновки до розділу 2

У результаті проведених теоретичних досліджень щодо удосконалення методу автоматичного антипомпажного захисту ВН ГПА на засадах інформаційної технології Data Fusion отримано такі результати:

1) розроблено описову фізичну модель взаємодії механічних, теплових і динамічних процесів у системі ВН ГПА з газотурбінним приводом, що дозволило визначити напрями подальших досліджень щодо удосконалення методу шляхом злиття (об'єднання) інформації про спостережуваний випадковий процес та використання нових методів оброблення інформації;

2) проаналізовано зв'язки математичної моделі процесу компримування газу ГПА з газотурбінним приводом, що дало змогу сформувати алгоритм функціонування об'єкта керування з урахуванням обмежень окремих компонентів векторів стану, керувальних дій і зовнішніх впливів, визначити матрицю функції передачі, модель типу МІ-МО ВН ГПА як багатовимірний об'єкт антипомпажного захисту та методику визначення функції передачі ВН на результатах спостережень;

3) сформовано підхід до розв'язання задачі синтезу спостерігача станів ВН ГПА за умов поточної невизначеності, що дало змогу сформувати критерій у вигляді математичного формулювання задачі досліджень, синтезувати алгоритмічну структуру системи автоматичного антипомпажного захисту ВН ГПА як багатовимірним об'єктом із спостерігачем його станів у вигляді моделі у змінних стану;

4) теоретично обґрунтовано використання методу злиття даних на основі нейро-нечіткої мережі та розроблено узагальнену функціональну структурну систему антипомпажного захисту ВН ГПА на засадах нейро-нечіткої мережі, що дозволяє покращити точність діагностування технічного стану ВН ГПА, підвищити ефективність та оперативність операторного керування ГПА шляхом використання сучасних технічних засобів контролювання і керування, забезпечити надійність роботи ГПА.

Тематиці розділу II присвячені роботи автора [67], [77], [79], [80], [81], [85], [86], [87].

РОЗДІЛ 3

ЕКСПЕРЕМЕНТАЛЬНО-ТЕОРЕТИЧНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ЩОДО РОЗРОБЛЕННЯ НОВОГО МЕТОДУ ОБРОБЛЕННЯ ІНФОРМАЦІЙНИХ СИГНАЛІВ У САК ГПА

3.1. Обґрунтування методу оброблення інформації в САК ГПА на осадах багатопараметричного злиття даних

Організація оптимального функціонування САК ГПА в умовах апіорної поточної невизначеності та при дії випадкових завад неможлива без використання спостерігачів станів системи, за допомогою яких можна було б виявити передпомпажний стан у ГПА і здійснити антипомпажний захист. При проектуванні САК ГПА із такими спостерігачами станів системи виникають найскладніші задачі класифікації [83].

Серед цих задач насамперед слід виділити задачу розпізнавання станів процесу компримування газу, який відбувається за умов невизначеності, що проявляється в неповноті і недостатній вірогідності апіорних даних про статистичні характеристики випадкових процесів, що діють у вимірюваних каналах зворотного зв'язку САК ГПА.

У роботах [90-92] та ін. доведено, що розв'язання задачі розпізнавання станів об'єктів керування за умов невизначеності можливе на основі спільного використання методів синтезу адаптивних та інваріантних класифікаторів. Проте дослідження в напрямі синтезу таких класифікаторів і спостерігачів станів ГПА як об'єктів керування і антипомпажного захисту не дістали подальшого розвитку в автоматизації процесів керування.

Якщо апіорі відомі всі параметри розподілу спостережуваного випадкового процесу, то можливий синтез оптимальних класифікаторів спостерігачів стані (СС) у рамках традиційної теорії статистичних рішень і учасної інформаційної технології Data Fusion (злиття, об'єднання, сумування,

даних). Властивість оптимальності СС проявляється в асимптотичній можливості до нуля ймовірності помилки розпізнавання станів ГПА як об'єкта керування зі збільшенням тривалості інтервалу спостереження.

З позиції автоматизації процесів керування задачу злиття даних у САК ГПА з газотурбінним приводом слід розглядати як спосіб підвищення ефективності взаємозв'язку між об'єктом керування і автоматичними керувальними пристроями, що дозволяє поєднати переваги стохастичних властивостей окремих контрольованих параметрів з обчислювальними можливостями мікропроцесорної техніки, забезпечити підвищення швидкодії системи антипомпажного захисту.

Відзначимо, що основною функцією злиття даних є використання контрольованих параметрів в інтеграційній моделі, у рамках якої можливо більш ефективно вирішити основні завдання системи автоматичного керування ПА.

Проте істотно бракує знань щодо реалізації методів злиття даних у системах автоматичного антипомпажного захисту ГПА ДКС ПСГ. Водночас проблемам застосування методів злиття даних у процесі керування ГПА приділено недостатньо уваги.

Оскільки якість розв'язання задачі оцінювання стану ВН ГПА суттєво залежить від повноти і адекватності моделі ВН ГПА, моделі вимірювань, моделі динаміки та моделі шумів, то для зручності розрахунків і виявлення помпажу доцільно мати для сумарного сигналу нормальний закон розподілу. Підставою для вибору такої моделі є теорема Ляпунова О. М., про те, що випадкова величина, отримана сумуванням великої кількості випадкових величин, має розподіл, близький до нормального. Проте адекватність її дійсному закону розподілу потребує досліджень.

Тому доцільним є визначення закону розподілу випадкового процесу, отриманого після багаметричного злиття даних у САК ГПА, та перевірка відповідності результату твердженням теореми Ляпунова, щодо нормального розподілу.

3.2. Аналіз контрольованих параметрів, що характеризують передпомпажний стан відцентрового нагнітача

Аналіз роботи ГПА № 9 типу Ц-6,3 з газотурбінним приводом Д-336-2 ДКС ПСГ “Більче-Волиця” дозволив вибрати чинники, що суттєво впливають на процес формування помпажу, і поділити їх на три групи [93]:

- змінні, що діють на вході ВН ГПА: частота обертання силової турбіни $N_{ст}(t)$, положення дозатору газу, тиск газу на вході нагнітача $P_{вх}(t)$ та об’єм газу на вході $Q_{вх}(t)$;

- некеровані зовнішні впливи: задана оператором частота обертання ротора нагнітача, коефіцієнт помпажу $K_{помп}$, що характеризують умови роботи ВН ГПА;

- показники роботи ГПА $\bar{x}(t)$, які вважатимемо компонентами вектора вихідних змінних

$$\bar{x}^T(t) = [Q_{пр}(t), P_{вих}(t), E(t), Q_{рец}(t)],$$

$$E = P_{вих} / P_{вх}; \quad (3.1)$$

де $Q_{рец}(t)$ – витрата рециркуляції;

$Q_{пр}(t)$ – продуктивність нагнітача;

$P_{вих}(t)$ – тиск газу на виході нагнітача.

Кожна із вихідних величин є функцією керувальних дій $u(t)$, та зовнішніх впливів f , які характеризують взаємодією об’єкта з навколишнім середовищем

$$\bar{x}_j = \varphi_j(\bar{u}(t), \bar{f}(t)), \quad j = 1, 2, \dots, n, \quad (3.2)$$

де n – кількість вихідних величин.

Специфіка задач антипомпажного захисту ВН від помпажу (індивідуальність характеристик ВН, мала кількість ГПА, різні умови їхньої роботи) в умовах ДКС ПСГ виключає осереднення результатів статистичного експерименту за множиною, залишаючи один шлях аналізу статистичних характеристик – за однією реалізацією кінцевої довжини.

Ми розглянули синхронні реалізації кінцевої довжини для досліджуваних параметрів, тривалість яких 200 секунд.

Система захисту компресора від помпажу, що вдосконалюється, включає вимірювання певної кількості параметрів, які характеризують робочий режим компресора [26] (таблиця 3.1).

Узагальнену інформацію про емпіричні та теоретичні щільності і функції розподілу досліджуваних параметрів ГПА наведено в додатку Б [94].

Таблиця 3.1

Таблиця давачів системи контролю ГПА № 9 ДКС ПСГ “Більче-Волиця”

№	Найменування	Одиниця вимірювання	Означення	Пояснення до параметру
1	2	3	4	5
1	dP_konph	кгс/см ²	Перепад тиску на конфузори	Перепад тиску на звужувальному пристрої за нагнітачем.
				Характеризує (непрямо) витрату газу через нагнітач. Бере участь у формулі для розрахунку Кромтраг. Чим ближче значення параметра до «0», тим менша витрата газу через нагнітач. За абсолютного «0» витрата газу через нагнітач дорівнює нулю.

Продовження табл. 3.1

1	2	3	4	5
2	E	Абсолютне значення	Ступінь підвищення тиску	Значення вказує на співвідношення тиску газу на виході $P_{вих}$ нагнітача до тиску газу на вході $P_{вх}$ нагнітача E $= P_{вих} / P_{вх}$. За нормальної роботи завжди більше ніж 1.
3	Gg_PON	мкм	Вібрація (віброперемі- щення) горизонтальне (g) передньої опори нагнітача (PON)	Значення характеризує величину вібрації на вказаних вузлах нагнітача. Вимірюється тарированими стандартизованими давачами, що закріплені безпосередньо у вказаних точках.
4	Gg_ZON	мкм	Вібрування (віброперемі- щення) горизонтальне (g) задньої опори нагнітача (ZON)	Те саме

Продовження табл. 3.1

1	2	3	4	5
5	Gv_PON	мкм	Вібрування (віброперемі- щення) вертикальне (v) передньої опори нагнітача (PON)	Те саме
6	Kpomrag	Абсолютне значення	Коефіцієнт – запас за помпажем	Обчислюється з класичної формули. Значення «0» і робота нагнітача в зоні 0–2 % відповідає наступленню помпажних явищ. Всі режими роботи нагнітача вище 5 % запасу – вважаються стійкими.
7	N_ст	об/хв.	Частота обертання вільної (силової, вільної) турбіни	Дорівнює частоті обертання нагнітача. Жорстко зв'язана з нагнітачем валом. Вимірюється дубльованими давачами.

За результатами досліджень статистичних характеристик основних факторів [67, 94, 95, 96], що характеризують роботу ВН ГПА ДКС ПСГ “Більче-Волиця”, визначено такі характеристики сигналів як гістограма, емпірична та теоретична щільність розподілу, закон розподілу, емпірична та теоретична функції розподілу тощо, що дало змогу обґрунтувати доцільність використання

логнормального закону розподілу для шести досліджуваних параметрів і використовувати їх для розв'язання задач захисту від помпажу.

3.2.1. Аналізування закону розподілу випадкового процесу, отриманого в результаті багатопараметричного злиття параметрів

В Україні на ДКС ПСГ “Більче-Волиця” створена і експлуатується система автоматичного керування ГПА № 9, що дає змогу реалізовувати складні задачі автоматичного керування і захисту [97]. Структурна схема САК ГПА Ц-6,3 складається з первинних вимірювальних перетворювачів (ПВП) і виконавчих механізмів (на рис. 3.1 не показано); пристрою керування (ПК); комп'ютерної мережі; пристрою оператора (ПО) – робочої станції [97].

САК ГПА – засіб автоматичного керування, що містить вимірювальні канали, до складу яких входять відповідні електричні тракти (ЕТ) і ПВП.

Вхідні та вихідні сигнали електричних трактів (ЕТ) такі:

Кількість вхідних сигналів: постійного струму 4-20 мА – 30; імпульсних з частотою 0-10 кГц – 4; від термопар – 4; від термометрів опору – 24; дискретних – 144.

Всі вхідні аналогові і дискретні канали гальванічно розв'язані від внутрішньої шини та між собою. Всі аналогові канали і ПВП нагнітача іскробезпечного виконання.

Кількість вихідних сигналів: постійного струму 4-20 мА – 2; дискретних – 64.

Максимальний струм навантаження, який комутують виконавчі органи САК при кожному вихідному сигналі керування, не перевищує:

- 2,0 А за напругою 220 В, 50 Гц змінного струму;
- 5,0 А за напругою 24 В постійного струму;
- 1,0 А за напругою 220 В постійного струму.

Вимірювальні канали (ВК) САК ГПА Ц-6,3 мають структуру двох видів:

– давач (ПВП) – лінія зв'язку – модуль зв'язку з об'єктом і процесор у складі комплексу;

– давач (ПВП) – нормувальний перетворювач – лінія зв'язку – модуль зв'язку з об'єктом і процесор в складі комплексу.

Ця сукупність засобів вимірювання і ліній зв'язку, розподілених у просторі, складає неперервний вимірювальний ланцюг від давача до термінального пристрою.

Внаслідок злиття (сумування) контрольованих параметрів отримуємо новий масив даних, для якого будемо гістограму відносних частот та перевіримо відповідність нормальному закону розподілу, використовуючи критерій Пірсона, за допомогою програмного пакета MathCAD [93].

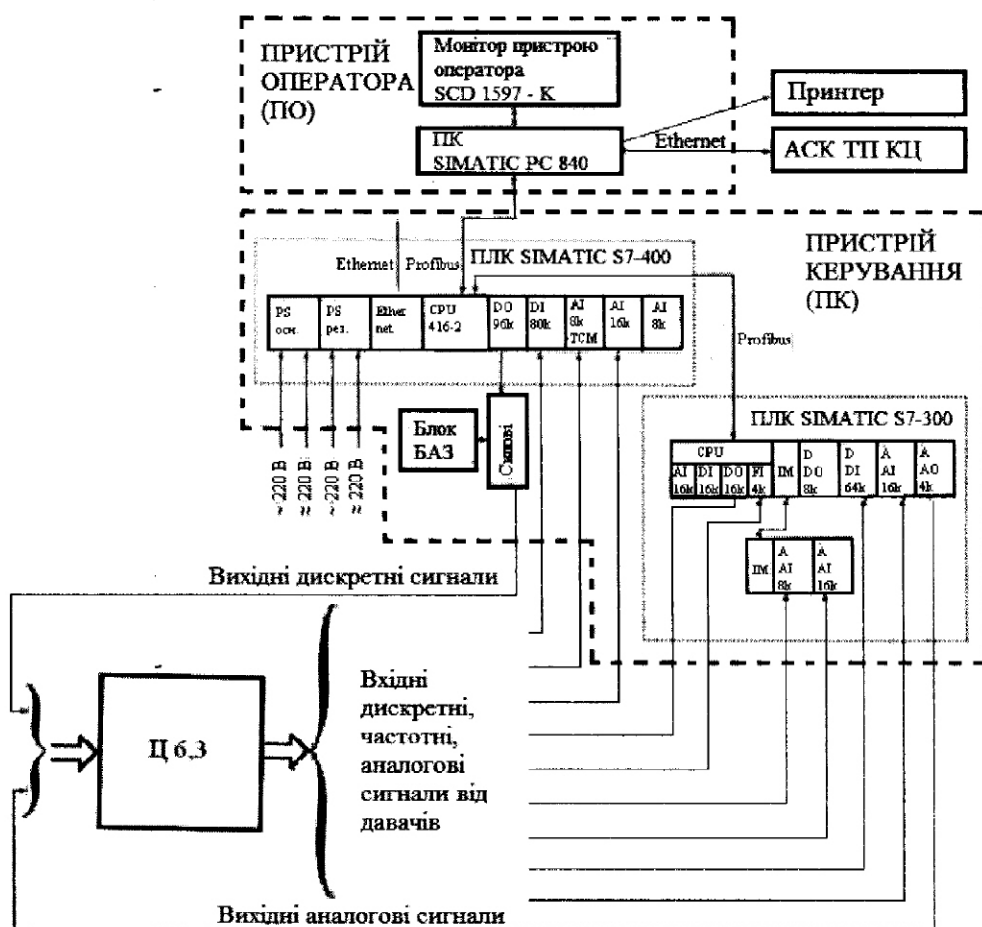


Рис. 3.1. Схема комплексу технічних засобів САК ГПА Ц-6,3

Обчислюємо розмах вибірки:

$x_{\max} := \max(X) \quad x_{\min} := \min(X) \quad R := x_{\max} - x_{\min}$
 $x_{\max} = 5.189 \times 10^3 \quad x_{\min} = 5.175 \times 10^3 \quad R = 13.921$
 $X := \text{sort}(X)$

Параметри інтервалу групування даних:

$$\text{ceil}(1 + 3.322 \cdot \log(n)) = 10 \quad m = 10$$

$$\Delta x := \frac{\text{ceil}(x_{\max}) - \text{floor}(x_{\min})}{m} \quad \Delta = 1.5$$

$$i := 0 \dots m \quad a_i := \text{floor}(x_{\min}) + \Delta \cdot (i - 1) \quad b_i := a_i + \Delta \quad x_i := \frac{a_i + b_i}{2}$$

$$j := 0 \dots m + 1 \quad \min(a) = 5.173 \times 10^3 \quad \max(b) = 5.19 \times 10^3$$

Визначимо вектор відносних частот:

$$f := \frac{\text{hist}(x1, X)}{n + \Delta}$$

$x1 =$

	0
0	$5.173 \cdot 10^3$
1	$5.175 \cdot 10^3$
2	$5.176 \cdot 10^3$
3	$5.178 \cdot 10^3$
4	$5.18 \cdot 10^3$
5	$5.181 \cdot 10^3$
6	$5.183 \cdot 10^3$
7	$5.184 \cdot 10^3$
8	$5.186 \cdot 10^3$
9	$5.187 \cdot 10^3$
10	$5.189 \cdot 10^3$
11	$5.19 \cdot 10^3$

$x =$

	0
0	$5.174 \cdot 10^3$
1	$5.176 \cdot 10^3$
2	$5.177 \cdot 10^3$
3	$5.179 \cdot 10^3$
4	$5.18 \cdot 10^3$
5	$5.182 \cdot 10^3$
6	$5.183 \cdot 10^3$
7	$5.185 \cdot 10^3$
8	$5.186 \cdot 10^3$
9	$5.188 \cdot 10^3$
10	$5.189 \cdot 10^3$

$f =$

	0
0	0
1	$8.333 \cdot 10^{-3}$
2	0.027
3	0.06
4	0.092
5	0.178
6	0.168
7	0.085
8	0.038
9	$5 \cdot 10^{-3}$
10	$5 \cdot 10^{-3}$

$$\text{mean}(X) = 5.184 \times 10^3$$

$$\text{stdev}(X) = 2.375$$

$$m := \text{mean}(X)$$

$$\sigma := \text{stdev}(X)$$

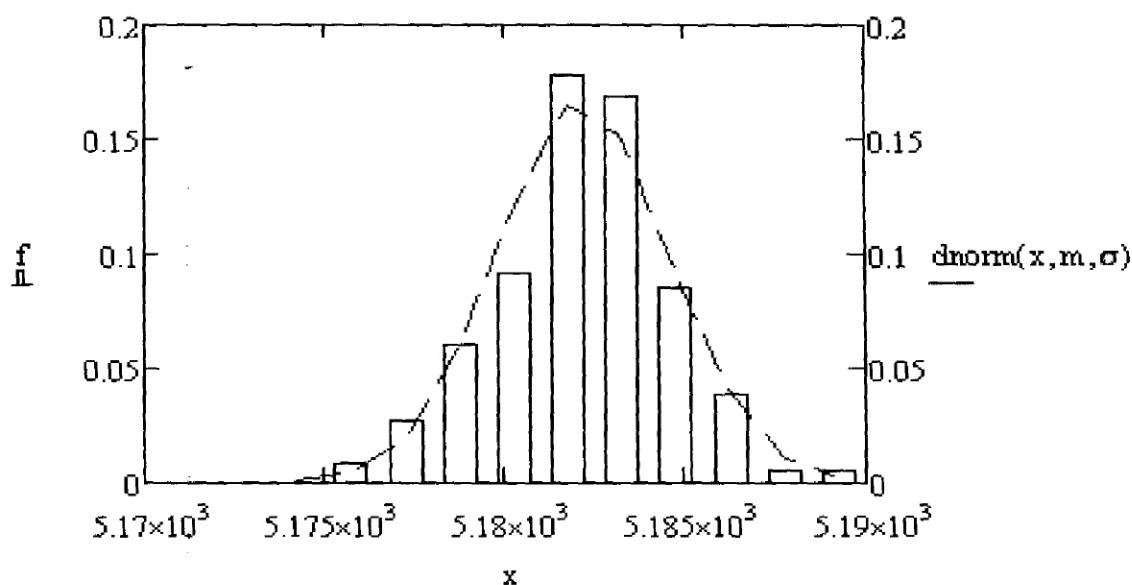


Рис. 3. 2. Гістограма відносних частот при злитті випадкових процесів

За отриманим рис. 3.2 можна припустити, що цей розподіл підпорядковується нормальному закону розподілу. Для підтвердження даної гіпотези скористаємось критерієм Пірсона.

Перевіряємо нормальний закон розподілу вибірки (X) з використанням коефіцієнтів асиметрії та ексцеса:

$$A := skew(X); \quad E := kurt(X);$$

$$A = -0.177; \quad E = 0.251.$$

$$DA := \frac{6 \cdot (n-2)}{(n+1) \cdot (n+3)}; \quad DE := \frac{24 \cdot n \cdot (n-2) \cdot (n-3)}{(n+1)^2 \cdot (n+3) \cdot (n+5)};$$

$$3 \cdot \sqrt{DA} = 0.365; \quad 5 \cdot \sqrt{DE} = 0.251.$$

Оскільки коефіцієнти асиметрії та ексцесу задовольняють нерівності:

$$|A| \leq 3 \cdot \sqrt{DA}; \quad |E| \leq 5 \cdot \sqrt{DE},$$

то гіпотеза про нормальний розподіл елементів вибірки підтверджується.

Перевіряємо нормальний закон розподілу вибірки (X) з використанням критерію узгодженості Пірсона. Обчислюємо середнє арифметичне, дисперсію та стандартне відхилення:

$$Mx := mean(X); \quad s1 = stdev(X); \quad s2 := var(X);$$

$$Mx = 5.182 \times 10^3; \quad s1 = 2.375; \quad s2 = 5.64.$$

Область зміни випадкової величини (X) розділяємо на 10 інтервалів, враховуємо кількість елементів вибірки, що потрапили в кожен з інтервалів, теоретичну імовірність потрапляння і дані інтервали за умови нормального розподілу:

$$\begin{aligned} m &:= 10 & \Delta x &:= \frac{\text{ceil}(x \text{ max}) - \text{floor}(x \text{ min})}{m} \\ j &:= 1 \dots m+1 & x_j &:= \text{floor}(x \text{ min}) + \Delta x \cdot (j-1) & x_1 &:= -\infty & \Delta x &= 1.5 \\ k &:= 1 \dots m & v &:= \text{hist}(x, X) & p_k &:= \text{pnorm}(x_{k+1}, Mx, s1) - \text{pnorm}(x_k, Mx, s1) & x_{m+1} &:= \infty \end{aligned}$$

Для контролю обчислюємо суми:

$$\sum_{i=1}^m p_i = 1 \quad \sum_{i=1}^m v_i = 1 \quad pn := p \cdot n$$

Обчислюємо суми:

$$\chi^2 := \sum_{i=1}^m \frac{(v_i - pn_i)^2}{pn_i} \quad \chi^2 = 13.675$$

Критичне значення критерію χ^2 :

$$\begin{aligned} \alpha &:= 0.05 \\ CR &:= \text{qchisq}(1 - \alpha, m - 3) \quad CR = 14.067 \end{aligned}$$

Оскільки розраховане за вибіркою значення χ^2 менше від критичного значення CR , то відповідно до критерію Пірсона гіпотеза про нормальний розподіл приймається.

Згідно з центральною граничною теоремою (формулювання Ляпунова), випадкова величина, що отримана додаванням великої кількості випадкових величин, має розподіл близький до нормального. У результаті злиття даних отриманий масив підпорядковується нормальному закону розподілу, що відповідає твердженню теореми Ляпунова.

Обчислимо розрахункові значення критерію Пірсона для масивів, утворених при додаванні параметрів, та порівняємо їх із критичним значенням (таблиця 3.2).

Таблиця 3.2

Таблиця критичного та розрахованих значень критерію “ χ -квадрат”

№	Позначення параметра	Критичне значення критерію χ -квадрат	Розраховане значення критерію “ χ -квадрат” за вибіркою при злитті параметрів					
			двох	трьох	чотирьох	п’яти	шести	семи
1	dP_konph	14,067	17,95	5,503	12,07	10,19	11,75	13,67
2	N_ст							
3	Gv_PON							
4	Gg_PON							
5	Kpompag							
6	Gg_ZON							
7	E							

Відповідно до критерію узгодженості Пірсона, з таблиці 3.2 видно, що при злитті двох параметрів, перепаду тиску на конфузори та частоти обертання силової турбіни, розраховане значення критерію “ χ -квадрат” більше за критичне значення, що спростовує гіпотезу про нормальний розподіл. При злитті трьох і більше параметрів розраховане значення критерію є меншим від критичного, що свідчить про нормальний розподіл.

У результаті об’єднання основних параметрів, що характеризують роботу відцентрового нагнітача газоперекачувального агрегату дотискувальної компресорної станції підземного сховища газу “Більче-Волиця”, таких як перепад тиску на конфузори, швидкість обертання силової турбіни, горизонтальна вібрація передньої опори нагнітача, вертикальна вібрація передньої опори нагнітача, горизонтальна вібрація задньої опори нагнітача, вертикальна вібрація задньої опори нагнітача, ступінь підвищення тиску,

Отримано сумарний випадковий сигнал, який підпорядковується нормальному закону розподілу, що відповідає твердженню теореми Ляпунова.

3.3. Розроблення інформаційної технології автоматичного захисту компресора від помпажу на основі технології злиття даних

Існує велика кількість теоретичних робіт щодо захисту компресорів від помпажу за різними критеріями. Однак проблеми їхнього практичного використання висвітлені не повною мірою та потребують апробації з подальшим удосконаленням у напрямі збільшення швидкодії систем автоматичного захисту компресорів від помпажу.

Тому доцільним є розвиток сучасного методичного інструментарію в контексті забезпечення підвищення швидкодії системи автоматичного захисту компресора з газотурбінним приводом від помпажу.

Розглянуто спосіб захисту компресора від помпажу, що здійснюється в робочому режимі компресора. При цьому виміряно параметри, що характеризують флуктуацію газового потоку, такі як тиски та температури газу на вході і виході компресора, частоту обертання його ротора, густину газу або швидкість звуку в ньому, об'ємну або масову витрату газу на вході або виході компресора. Проте на КС ПСГ явища, під час яких відбуваються пульсації потоку газу, що призводять до входження робочої точки нагнітача в нестационарний режим роботи, викликають збільшення вібрування опор нагнітача, осьовий зсув вала нагнітача, трубопроводів обв'язки; зміну напрямку осьового зусилля на ротор нагнітача і силової турбіни, яке стає закономірним; циклічну зміну навантаження приводу нагнітача, тому вимірювання параметрів, які характеризують тільки флуктуації газового потоку, не є достатнім для аналізування і встановлення зв'язків між розвитком помпажних явищ у нагнітачі, та ступеня їхнього впливу на характер зміни технологічних параметрів, щоб забезпечити підтримання робочої точки характеристики нагнітача поблизу помпажної зони [26].

В основу запропонованого способу захисту [26] покладено завдання визначення моменту виникнення та ступінь розвитку помпажних явищ у нагнітачі компресорного агрегату з газотурбінним приводом шляхом алгоритмічного аналізу та порівняння причинно-наслідкових зв'язків між процесом розвитку помпажних явищ у нагнітачі і взаємозв'язків між розвитком явища як процесу помпажу та ступенем впливу його на характер зміни технологічних параметрів, якими характеризується робота компресора газоперекачувального агрегату та його газотурбінного приводу. Це дозволить своєчасно сформулювати відповідну керувальну дію для систем автоматики ГПА і тим самим попередити входження робочої точки нагнітача в зону “жорсткого” або “м'якого” помпажу.

Підтримання робочої точки характеристики нагнітача поблизу помпажної зони дозволить забезпечити оптимальний режим роботи компресорної станції з максимальним завантаженням агрегатів і попередити аварійні ситуації.

Поставлене завдання вирішується завдяки тому, що у способі захисту компресора від помпажу, який включає вимірювання параметрів, що характеризують робочий режим компресора, визначають їхню віддаленість від заданої величини і пропорційно їй змінюють стан органів управління компресора. Вимірювання параметрів, що характеризують робочий режим компресора, включає вимірювання відповідними давачами:

- перепаду тиску на конфузори нагнітача;
- швидкості обертання силової турбіни газотурбінного приводу та нагнітача;
- горизонтального вібропереміщення задньої опори нагнітача;
- вертикального вібропереміщення задньої опори нагнітача;
- горизонтального вібропереміщення передньої опори нагнітача;
- вертикального вібропереміщення передньої опори нагнітача;
- осьового зсуву нагнітача; де вихід кожного давача з'єднаний з відповідними входами АЦП, сигнали з яких надходять до програмного модуля контролера. Цей контролер забезпечує алгоритмічну обробку кожного з

сигналів за індивідуальним каналом та миттєве порівняння кожного поточного значення сигналу з таблицею попередніх значень, що надійшли до контролерного стеку за певний проміжок часу, де вираховується середнє значення кожного параметра, яке використовується алгоритмом для обрахування нового середнього значення кожного параметра при поступленні кожного чергового по такту. Після цього визначають коефіцієнт за параметром як співвідношення усередненого значення певного параметра за таблицею стеку до поточного значення контрольованого параметра від давача, перевищення якого над наперед відомим коефіцієнтом за певним параметром класифікується алгоритмом як ознака наявності помпажних коливань за параметром, і заносять до оперативної таблиці запам'ятовування, де після виникнення не менше ніж чотирьох ознак наявності помпажних відхилень певного параметра і не менше ніж за чотирма параметрами формується сигнал про наявність помпажу в компресорі, який подають на виконавчий орган САК.

На підставі експериментальних досліджень було виявлено, що з понад усіх технологічних параметрів, що характеризують робочий режим компресора, вимірювання та алгоритмічний аналіз таких параметрів як перепад тиску на конфузорі нагнітача, швидкості обертання силової турбіни газотурбінного приводу і відповідно – нагнітача, горизонтального вібропереміщення задньої опори нагнітача, вертикального вібропереміщення задньої опори нагнітача, горизонтального вібропереміщення передньої опори нагнітача, вертикального вібропереміщення передньої опори нагнітача, осьовий зсув нагнітача, більш за все дають можливість визначити момент настання і ступінь розвитку помпажних явищ та їхній вплив на характер зміни цієї групи технологічних параметрів.

Замкнутий контур регулювання та ідентифікації, що включає давачі, АЦП, програмний модуль контролера, виконавчі органи САК, функціонує в одному темпі з керованим ГПА і підтримує його за допомогою керувальних дій у оптимальному для поточних умов перекачування газу режимі. При зміні

технологічних параметрів САК повертає ГПА в заданий стан, за якого робоча точка характеристики нагнітача підтримується поблизу помпажної зони.

Для постійного коригування стану ГПА служить розроблене авторами програмне забезпечення, що реалізується програмним модулем контролера, відповідно з яким оцінюють параметри ГПА за результатами спостережень вхідних сигналів від давачів, миттєво порівнюють з попереднім обрахованим середнім значенням кожного параметра. Це значення вираховується алгоритмом для обрахунку нового середнього значення при надходженні наступного по такту, за яким визначається коефіцієнт параметра, перевищення якого над наперед заданим класифікують як ознаку наявності передпомпажних коливань, де у разі виникнення не менше ніж чотирьох ознак наявності помпажних відхилень певного параметра і не менше ніж за чотирма параметрами формується сигнал, що передається до керувального пристрою. Таким чином досягається максимальна швидкодія система захисту ГПА від помпажу.

У разі виникнення відхилень у кількості, меншій ніж за чотирма аналізованими параметрами, алгоритм керувальну дію не формує, а розглядається, як випадкові відхилення вхідного сигналу від норми.

Кількість у чотири мітки, за яких система формує сигнал “помпаж”, пояснюється неоднорідністю одночасного виникнення характеристик ознак помпажних явищ за всіма параметрами нагнітача на різних режимах роботи, а також необхідністю забезпечити надійність системи у випадках неспрацювання давачів або каналів вимірювання, що призводить до хибних висновків про стан ГПА.

Отже, цей спосіб захисту компресора від помпажу оснований на використанні вимірних сигналів. Використання інформативних вимірювань приводить до того, що у будь-який момент часу з'являється відхилення вимірних сигналів даного процесу від норми. Причинами таких відхилень є порушення технологічного процесу, зокрема явище помпажу; статистичні вимірювальні помилки або відмови елементів вимірювальної системи. Тому виникають наступні проблеми:

- коли ми можемо говорити про істотне відхилення вимірних сигналів, наприклад, внаслідок помпажу;
- як виміряні сигнали розподіляються відповідно до існуючих класів або груп майже рівних вимірних сигналів.

Для вирішення вказаних проблем, необхідно створити метод, який може керувати усією доступною інформацією у вигляді вимірних сигналів швидко і одночасно [80].

Організація оптимального функціонування системи, оптимального регулювання і захисту компресорів від помпажу в контурі зворотного зв'язку неможлива без використання спостерігачів, математичну основу яких складають методи теорії статистичних рішень.

Наявність потрібної інформації про досліджувані сигнали в системі антипомпажного захисту дозволяє застосувати один з новітніх методів інформаційних технологій Data Fusion – метод злиття даних для підвищення швидкодії системи.

Оскільки технологічний процес компримування природного газу є багатовимірним і залежить від великої кількості взаємопов'язаних вхідних величин, то структуру моделі “МІ-МО” ГПА як об'єкта антипомпажного регулювання і захисту розглядали відповідно до поставлених завдань автоматизації (рис. 3.5) [80].

До першої групи змінних $y(t)$, що діють на вході ГПА, віднесені частота обертання силової турбіни $N_{ст}$, положення дозатора газу $пол.ДГ$, тиск газу на вході в нагнітач $P_{вх}(t)$ та об'єм газу на вході $Q_{вх}(t)$.

$$\overline{y^T}(t) = (N_{ст}(t), пол.ДГ, P_{вх}(t)) \quad (3.3)$$

До другої групи віднесені некеровані зовнішні впливи $z_{зов}(t)$ – задана оператором частота обертання ротора нагнітача та коефіцієнт помпажу $K_{помп}$.

До третьої групи віднесені показники групи ГПА $\bar{x}(t)$, які вважатимемо компонентами вектора вихідних чинників:

завколишнього середовища, атмосферний тиск та інших, вхідні і вихідні змінні ГПА вимірюють з певними похибками, які можна трактувати як адитивні шуми $\tilde{f}(t)$.

Алгоритм функціонування об'єкта керування:

$$\begin{aligned}\tilde{Q}_{np}(t) &= A_1 \{ \tilde{Q}_{ex}(t), \tilde{N}_{cm}(t), \tilde{P}_{ex}(t), \tilde{z}_{zavd}(t), \tilde{f}(t) \}, \\ \tilde{P}_{ex}(t) &= A_2 \{ \tilde{Q}_{ex}(t), \tilde{N}_{cm}(t), \tilde{P}_{ex}(t), \tilde{z}_{zavd}(t), \tilde{f}(t) \}, \\ \tilde{E}(t) &= A_3 \{ \tilde{Q}_{ex}(t), \tilde{N}_{cm}(t), \tilde{P}_{ex}(t), \tilde{z}_{zavd}(t), \tilde{f}(t) \}\end{aligned}\quad (3.6)$$

де A_1, A_2, A_3 – оператори зв'язку вихідних чинників з вхідними змінними ГПА.

Для виявлення явища помпажу і захисту ГПА від жорсткого помпажу запропоновано додатково контролювати параметри, що входять до кортежу $\text{Pompage} \langle dP_{\text{конф}}, N_{\text{ст}}, Gg_{\text{ZON}}, Gv_{\text{ZON}}, Gv_{\text{PON}}, Gg_{\text{PON}}, G_{\text{szcuvN}}, K_{\text{pompag}} \rangle$.

Зважаючи на те, що метою автоматичного антипомпажного захисту є досягнення максимальної швидкодії, умову оптимального керування запропоновано оцінювати у такому вигляді:

$$Q(\bar{y}(t)) = \int_{t_0}^{t_k} \varphi_0 [\bar{x}(t), \bar{z}_{zo}(t), \bar{y}(t)] dt, \quad (3.7)$$

де $t_k - t_0$ – інтервал керування, φ_0 – деяка невідома скалярна функція, вигляд якої залежить від мети. Оскільки метою антипомпажного захисту є досягнення мінімальної тривалості перехідного процесу, та вважатимемо, що $\varphi_0[\cdot] \equiv 1$ і тоді

функціонал (3.7) набуває тривіального вигляду $Q_{\pi} = \int_{t_0}^{t_k} 1 \cdot dt = t_k - t_0 = T \rightarrow \min_{\bar{y}(t) \in Y}$.

При цьому враховані обмеження на змінні $\bar{x}(t), \bar{z}_{zo}(t), \bar{y}(t)$, що задані у вигляді умов належності векторів $\bar{x}(t), \bar{z}_{zo}(t)$ та $\bar{y}(t)$ до деяких замкнутих множин

$$\bar{x}(t) \in X; \quad \bar{z}_{zo}(t) \in Z_{zo}; \quad \bar{y}(t) \in Y, \quad (3.8)$$

де X, Z_{zo}, Y – замкнені множини, задані відповідно в n -, l -, m -мірних просторах. Обмеження на компоненти векторів $\bar{x}(t), \bar{z}_{zo}(t), \bar{y}(t)$ покладені

залежно один від одного: $0 \leq x_n \leq x_{n_{\max}}$; $0 \leq z_{\alpha}^l \leq z_{\alpha_{\max}}^l$; $0 \leq y_m \leq y_{m_{\max}}$, де $x_{n_{\max}}$, $z_{\alpha_{\max}}^l$, $y_{m_{\max}}$ – максимально допустимі значення компонентів.

Отже, шуканий мінімальний час T є функціоналом (3.7), що залежить від пріоритетних керувальних дій $y(t)$, $0 \leq t \leq T$, сформованих системою типомпажного захисту.

Завдання автоматичного захисту ГПА від помпажу, що вимагають певного оцінювання інформації з декількох джерел, можуть отримати ефективне вирішення за допомогою використання методів злиття даних / інформації (Data Fusion, DF-методи). Терміни злиття даних та злиття інформації зазвичай використовуються як синоніми, однак термін злиття даних більш коректно застосовувати до неопрацьованих даних, отриманих безпосередньо від датчиків, а термін злиття інформації використовують для вже оброблених даних [97].

Джерела інформації, застосовуються при злитті даних поділяють на [98]:

- доповнювальні: якщо вхідні дані являють собою різні характеристики об'єкта керування і тому злиття забезпечить більш повну інформацію;
- надмірні: якщо два або більше джерела даних надають схожу інформацію, а злиття відбувається для збільшення її надійності;
- кооперативні: якщо вхідна інформація об'єднується в нову інформацію, яка, як правило, є більш складною.

Однією з найбільш відомих систем класифікацій технологій на основі DF-методів є [54]:

- дані-дані (DAI-DAO): цей тип є основним DF-методом, розглянутим у класифікації. Він використовує вхідні і вихідні неопрацьовані дані; результат, як правило, є більш надійним і точним. Злиття даних на цьому рівні проводиться відразу після того, як дані отримані від датчиків;
- дані-функція (DAI-FEO): на цьому рівні процес злиття даних використовує вхідні неопрацьовані дані з джерел для вилучення з них

властивостей або характеристик, які описують об'єкт у навколишньому середовищі;

- функція-функція (FEI-FEO): на цьому рівні як входами, так і виходами процесу злиття даних є функції. Отже, процес злиття даних усуває ряд функцій для покращення, удосконалення або отримання нових функцій;

- функція-рішення (FEI-DEO): цей тип отримує набір функцій у вигляді вхідних даних і надає ряд рішень на виході. Більшість систем, що потрапляють до цієї категорії класифікації, здобувають рішення, базуючись на даних від операторів;

- рішення-рішення (DEI - DEO): цей тип класифікації також відомий як синтез рішень. Він об'єднує існуючі рішення для отримання більш інформативних чи нових рішень.

Зазвичай інформацію, яку використовують для діагностики технічного стану газоперекачувальних агрегатів, попередньо опрацьовують.

У системах діагностики і прогнозування технічного стану газоперекачувальних агрегатів, джерела даних, як правило, розподілені і неоднорідні. Вони можуть бути різні за своєю природою, мають різну шкалу вимірювання, точність і невизначеність [54, 78]. Правильна попередня обробка даних може покращити продуктивність системи діагностики або прогнозування технічного стану газоперекачувальних агрегатів.

Ми використали інтерактивну процедуру синтезу системи антипомпажного захисту, що забезпечує потрібну швидкодію, точність і зручність її реалізації в умовах експлуатації САК ГПА ДКС ПСГ. Запропоновано загальну структуру системи (рис. 3.6), що реалізує розроблений DF-метод і програмне забезпечення системи антипомпажного захисту у варіанті конкретного прикладу [54, 86].



Рис. 3.6. Структурна схема системи антипомпажного захисту ГПА

Вона містить групу інтелектуальних HART-давачів, HART-MUX-мультіплексом Метран – 670, персональний комп'ютер HART-Master, послідовний порт комп'ютера COM, джерело живлення постійного струму, антипомпажний клапан. Шістнадцятиканальний HART - мультіплексом Метран – 670 призначений для зв'язку інтелектуальних HART-давачів із комп'ютером або АСКТП. Як давачі можуть бути використані давачі тиску Метран-150, Метран100, Метран-49, Rosemount 3051, Rosemount 3051S перетворювачі витрати Метран-300 ПР, Метран-305 ПР та інші. HART – мультіплексор не є засобом вимірювання і не вносить додаткової похибки в аналоговий вимірювальний сигнал. Він забезпечує перетворення інформаційного сигналу HART у цифровий сигнал з інтерфейсом RS 485 або RS 232, при цьому аналоговий сигнал 4-20 мА струмового кола може використовуватись системою ресстрування та керування.

Під час експлуатації автоматичної системи антипомпажного захисту, що має у своєму складі давачі первинної інформації про фактори, які характеризують робочий режим компресора, виникають проблеми відмови

давачів і їхнє помилкове спрацювання [99]. Одним із шляхів вирішення проблеми є структурний метод [100], що зводиться до об'єднання кількох давачів первинної інформації в один комплексний давач за допомогою пристрою вибору, що забезпечує видачу результуючого сигналу залежно від вхідних сигналів давачів.

Важливим завданням є вибір кількості давачів первинної інформації, що входять до комплексного давача з n однакових давачів первинної інформації, після отримання сигналу від яких має спрацювати система антипомпажного захисту.

Припустимо, що на давачі первинної інформації (рис. 3.7) діють некорельовані випадкові завади, внаслідок чого їхнє спрацювання носить випадковий характер і не залежить одне від одного.

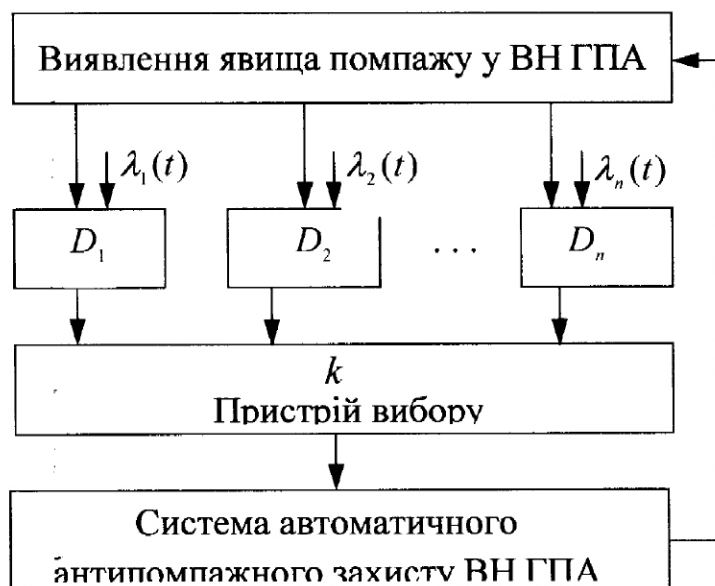


Рис. 3.7. Схема роботи комплексного давача первинної інформації:

D_1, D_2, \dots, D_n - давачі первинної інформації в САК ГПА

Пристрій вибору реалізовано таким чином, що при отриманні сигналів від не менше, ніж k давачів первинної інформації, видається сигнал для спрацювання системи автоматичного антипомпажного захисту ВН ГПА. Випадковий характер спрацювання давачів первинної інформації

призводить до виникнення помилок двох видів [100]: помилка першого роду – відмова давача при виникненні явища помпажу та помилка другого роду – хибне спрацьовування давача.

Застосування сучасних інформаційних технологій, оснований на DF-методах, для моніторингу технічного стану газоперекачувальних агрегатів базується на використанні усієї доступної інформації, що покращить ефективність і швидкодію автоматичного захисту від помпажу, а також, надійність та стабільність роботи компресорної станції загалом. Застосування методу багатопараметричного злиття даних може покращити продуктивність системи оцінювання поточних значень у декількох напрямках, таких як швидкодія, точність, надійність і робастність.

3.4. Метод виявлення явища помпажу у відцентрових нагнітачах

ПА

Метою дослідження є визначення впливу типу кожної з точок положення рівноваги на основі знайдених значень коренів та висунутих положень на виникнення передпомпажних ефектів та явища помпажу у відцентрових нагнітачах газоперекачувальних агрегатів.

Завданням дослідження є визначення зв'язку між типом точки положення рівноваги на виникненням коливальних явищ у відцентрових нагнітачах газоперекачувальних агрегатів.

Для досягнення поставленої мети були поставлені такі завдання:

1. Запропонувати модель визначення зон втрати стійкості розв'язків системи диференціальних рівнянь, що дозволяє встановити, що явище помпажу корелює з втратою стійкості розв'язків системи, яка описує взаємозв'язок між параметрами, контрольованими на діючих компресорних станціях.

2. Встановити тип кожної з точок положення рівноваги та визначити, як відповідні значення характеризують явище помпажу або виникнення передпомпажних ефектів.

Методичною основою для одержання наведених результатів вивчення явища компажу у відцентрових нагнітачах газоперекачувальних агрегатів є основи теорії жорсткості диференціальних рівнянь, механіки газодинамічних машин, методи чисельного розв'язку звичайних диференціальних рівнянь (метод зважених зв'язок), методи апроксимації функцій для обробки результатів експериментального вимірювання параметрів $p(t), Q(t)$.

Для вивчення властивостей руху газу в камері зберігання розглядаються такі рівняння [102]:

– рівняння витрати:

$$\rho dv + v d\rho = 0, \quad (3.9)$$

де ρ – густина, v – швидкість газу;

– рівняння імпульсів без урахування зовнішніх сил:

$$dp + \rho v dv = 0, \quad (3.10)$$

– рівняння притоку тепла у формі:

$$dV = -pd\left(\frac{1}{\rho}\right) + dq^{(e)} = 0, \quad (3.11)$$

або, з урахуванням $V = \frac{1}{\gamma - 1} \frac{p}{\rho} + const$,

$$\frac{1}{\gamma - 1} d\left(\frac{p}{\rho}\right) + p d\left(\frac{1}{\rho}\right) = dq^{(e)},$$

де $dq^{(e)}$ – притік тепла; p – тиск в газі; γ – показник адіабати, V – внутрішня енергія.

Розв'язуючи (3.9)-(3.11) відносно dv ; dp ; $d\rho$ одержуємо:

$$\begin{cases} \frac{dv}{v} = \frac{1}{1 - M^2} (\gamma - 1) \frac{dq^{(e)}}{a^2}; \\ \frac{d\rho}{\rho} = -\frac{dv}{v}; \\ \frac{dp}{p} = -\frac{\gamma M^2}{(1 - M^2)} (\gamma - 1) \frac{dq^{(e)}}{a^2}; \end{cases} \quad (3.12)$$

$Ma = \frac{v}{a}$; $M = \frac{v}{a}$ – число Маха, a – швидкість звуку, крім того:

$$(\gamma - 1) \frac{dq^{(e)}}{a^2} = (1 + \frac{\gamma - 1}{2} M^2) \frac{dT^*}{T^*}. \quad (3.13)$$

Із формули (3.12) видно, що в циліндричному каналі з підведенням тепла в дозвукових режимах руху швидкість потоку росте, а тиск – падає, на надзвукових – навпаки. Оскільки

$$\frac{dM^2}{M^2} = \frac{1 + \gamma M^2}{1 - M^2} (\gamma - 1) \frac{dq^{(e)}}{a^2} \quad (3.14)$$

то, згідно з [102], можна зробити висновок, про те, що підведення тепла при $M < 1$ веде до зростання M^2 , а при $M > 1$ – до його спадання.

Отже, при підведенні тепла до дозвукового потоку в циліндричному каналі швидкість може рости лише до певної величини, яка називається критичною швидкістю $v_{кр}$, після досягнення якої подальше підведення тепла до частинок газу в циліндричному каналі стає неможливим – настає момент теплової кризи. Зі спробою підведення тепла додатково, наприклад, із продовженням спалення палива, виникає два можливі випадки: або течія перебудується, параметри на вході в камеру зміняться, швидкість на виході впаде до такої величини, що при новому підведенні тепла швидкість дорівнюватиме швидкості звуку в кінці камери, або, якщо така перебудова неможлива (спеціальними пристроями забезпечується подача газу в камеру із строго визначеними параметрами), то при примусовому підведенні тепла стає неможливим стаціонарний перебіг процесу течії, виникають нестационарні рухи, зокрема, помпаж.

Помпаж часто пов'язують із явищем гідроудару [8, 103, 104] – перепадом тиску в будь-якій системі, заповненій рідиною, викликаним швидкою зміною швидкості течії цієї рідини.

Рівняння, що описують рух рідини або газу, зокрема газу [103], записують у вигляді:

$$\begin{cases} L\dot{Q} = F_1(Q) - p \\ Cp = Q - F(p), \end{cases} \quad (3.15)$$

в якій $L = L(\rho, l, s, Q_0)$; $C = C(\rho_0, \rho, s, l, C_0)$,

де ρ – густина, l, s – характерні розміри та площі робочої частини, Q_0 – початкові витрати, ρ_0 – початкова густина продукту, що транспортується, C_0 – швидкість звуку, Q, p – об'ємна витрата та тиск, $F_1(Q), F(p)$ – деякі функції, що визначаються експериментально. Очевидно, що розвивання системи (3.15) є можливим лише за умови, коли всі зазначені функції є відомими, що часто є задачею, розв'язуваною або з використанням комплексних експериментальних досліджень, або часто взагалі не можуть бути визначені в умовах реальної компресорної станції. Водночас на діючих компресорних станціях контролюються параметри Q та p у вигляді експериментально визначених функцій від часу t : $p(t), Q(t)$ [105].

Запропоновано таку модель визначення зон втрати стійкості розв'язків системи диференціальних рівнянь типу (3.15), а отже умов виникнення помпажу: нехай у загальному випадку праві частини системи (3.15) розкладаються в ряд Тейлора і записуються з утриманням членів, вищих за квадратичні. Такий підхід є вмотивованим, по-перше, за результатами аналізу літературних джерел [102-104], а також, по-друге, тією обставиною, що реальні значення функції $L = L(\rho, l, s, Q_0)$; та $C = C(\rho_0, \rho, s, l, C_0)$ в практичних задачах можуть бути визначені лише наближено. Тому система (3.15) записується у вигляді:

$$\begin{cases} \dot{p} = A_1 + A_2 p + A_3 Q + A_4 p^2 + A_5 p Q + A_6 Q^2 \\ \dot{Q} = A_7 + A_8 p + A_9 Q + A_{10} p^2 + A_{11} p Q + A_{12} Q^2 \end{cases} \quad (3.16)$$

Для коректної постановки задачі необхідно знати початкові умови, що є відомими як характеристики відповідного агрегату:

$$p(0) = p_0; Q(0) = Q_0. \quad (3.17)$$

У системі (3.16), коефіцієнти $A_i, i=1, \dots, 12$ є невідомими і підлягають визначенню в процесі розв'язання задачі.

Якщо (за наведеними вище припущеннями) відомими є результати експериментального визначення функції $p_p(t)$ та $Q_p(t)$, одержані протягом деякого часу $t \in [0, T]$, де T – час завершення спостережень, то підставивши в систему (3.16), одержуємо дві нев'язки

$$\begin{cases} R_1(t, A_1, \dots, A_6) = \dot{p}_p(t) - A_1 - A_2 p_p - A_3 Q_p - A_4 p_p^2 - A_5 p_p Q_p - A_6 Q_p^2 \\ R_2(t, A_7, \dots, A_{12}) = A_7 - A_8 p_p - A_9 Q_p + A_{10} p_p^2 + A_{11} p_p Q_p + A_{12} Q_p^2 - \dot{Q}_p(t) \end{cases} \quad (3.18)$$

Коефіцієнти A_i необхідно визначити таким чином, щоб лінеаризувати значення нев'язок (3.18). Цього можна досягнути принаймні двома методами: або шляхом мінімізації функції

$$R(t_s, A_i) = \sum_{s=1}^N [R_1^2(t_s, A_j) + R_2^2(t_s, A_k)] \rightarrow \min, \quad (3.19)$$

де $i = 1, \dots, 12, j = 1, \dots, 6; k = 6, \dots, 12, s = 1, \dots, N$, N – кількість точок t_s в яких проводилось визначення значень $p(t)$ та $Q(t)$, або з використанням методу зважених нев'язок у формі Гальоркіна [106], шляхом розв'язання системи лінійних алгебраїчних рівнянь такого виду:

$$(R_1, w_i) = 0 \quad i = 1, \dots, 6 \quad (3.20)$$

для визначення $A_i; i = 1, \dots, 6$ і системи

$$(R_2, w_i) = 0 \quad i = 1, \dots, 6 \quad (3.21)$$

для визначення $A_j; j = 7, \dots, 12$.

У системах лінійних алгебраїчних рівнянь прийнято такі позначення:

$$(R_2, w_i) = \int_0^T R w_i dt, \quad (3.22)$$

де

$$w_1 = 1; w_2^0 = p(t); w_3 = Q(t); w_4(t) = p^2(t); w_5(t) = p_p(t) Q_p(t); w_6(t) = Q_p^2(t). \quad (3.23)$$

Очевидно, що інтеграли (3.20) та (3.21), що містяться в лівій частині, є лінійними функціями: функції в лівій частині (3.20) будуть лінійними за

$A_i; i = 1, \dots, 6$, а функції, що містяться в лівій частині (3.21), є лінійними за $A_j; j = 7, \dots, 12$. В інтегралі (3.22) значення T є часом, протягом якого визначались значення $p_p(t)$ та $Q_p(t)$.

Очевидно, що функція (3.19) є квадратичною додатно визначеною формою від $A_i; i = 1, \dots, 12$, тому вона має єдиний мінімум – точку (A_1^E, \dots, A_{12}^E) , а системи (3.20) та (3.21) також мають єдиний розв'язок через незалежність (функціональну) функцій $w_i(t)$, які вводяться за правилом (3.24). Якщо функції $w_i(t)$ знаходять аналітично (наприклад, їх відтворюють із використанням апроксимаційних або інтерполяційних процедур), то інтеграли, що входять до (3.20) та (3.21) також беруть аналітично, в тих самих випадках, коли $w_i(t)$ знаходять таблично, зазначені інтеграли беруть із використанням дискретних формул для інтегрування таблично заданих структур [107].

Отже, в обох пропонованих підходах коефіцієнти $A_i; i = 1, \dots, 12$ визначають однозначно, тобто задача знаходження A_i є коректною постановкою [108].

За результатами розв'язання задач (3.19) та систем (3.20) і (3.21) одержують значення A_i , що входять до системи (3.16). Зазначену систему нелінійних рівнянь необхідно дослідити на стійкість їхнього положення рівноваги. Зазначені положення рівноваги знаходять шляхом розв'язку системи рівнянь виду (3.10) (вважають, що $\frac{dp}{dt} = 0$ та $\frac{dQ}{dt} = 0$):

$$\begin{cases} A_1^E + A_1^E p + A_3^E Q + A_4^E p^2 + A_5^E pQ + A_6^E Q^2 = 0 \\ A_7^E + A_8^E p + A_9^E Q + A_{10}^E p^2 + A_{11}^E pQ + A_{12}^E Q^2 = 0 \end{cases} \quad (3.24)$$

Необхідність знаходження точок положення рівноваги виникає у зв'язку з тим, що висувається гіпотеза про те, що явище помпажу корелює з втратою стійкості розв'язків системи (3.16), яка описує взаємозв'язок між величинами p та Q .

Рівняння системи (3.24) є рівняннями кривих другого порядку, тому можлива ситуація, за якої вона взагалі не має розв'язків над полем дійсних

чисел. У такому разі стійкість системи визначається аналізом одержаних розв'язків шляхом безпосередньої перевірки умов стійкості. Загалом зазначена система може мати від одного до чотирьох розв'язків (це перевіряють шляхом аналізу взаємного розташування відповідних кривих другого порядку). Після розв'язання системи (3.24) визначають координати точок рівноваги $(x_0^i; y_0^i)$ $i = 1, \dots, N_1$, N_1 – кількість точок рівноваги. Подальше дослідження полягає у визначенні типу кожної особливої точки системи. Для цього в кожній точці $(x_0^i; y_0^i)$ праві частини системи (3.24) лінеаризуються за відомими правилами розкладу функції двох змінних у ряд Тейлора:

$$f(x, y) = f(x_0^i; y_0^i) + \frac{\partial f}{\partial x}(x_0^i; y_0^i)(x - x_0^i) + \frac{\partial f}{\partial y}(x_0^i; y_0^i)(y - y_0^i) + r_n(x, y, x_0^i, y_0^i), \quad (3.25)$$

де $r_n(x, y, x_0^i, y_0^i)$ – залишковий член ряду Тейлора.

Для лінеаризованої системи (3.24), що набуває вигляду:

$$\begin{cases} \frac{dx}{dt} = a_0^i x + b_0^i y \\ \frac{dy}{dt} = c_0^i x + d_0^i y \end{cases}, \quad (3.26)$$

знаходяться власні числа матриць цих систем із відомої умови:

$$\begin{vmatrix} a_0^i - \lambda & b_0^i \\ c_0^i & d_0^i - \lambda \end{vmatrix} = 0 \quad (3.27)$$

$$\lambda^2 - (a_0^i + d_0^i)\lambda + a_0^i d_0^i - c_0^i b_0^i = 0. \quad (3.28)$$

Після знаходження відповідних коренів рівняння (3.28) λ_1 та λ_2 , встановлюється тип кожної із точок положення рівноваги на основі таких положень [109]:

1. λ_1 та λ_2 – дійсні;
 - а) $\lambda_1, \lambda_2 > 0$ – нестійкий вузол;
 - б) $\lambda_1, \lambda_2 < 0$ – стійкий вузол;
 - в) λ_1 і λ_2 – різних знаків – сідло.

2. λ_1 та λ_2 – комплексні; $\lambda_{1,2} = \alpha \pm i\beta$

а) $\alpha > 0$ – стійкий фокус;

б) $\alpha < 0$ – стійкий фокус;

в) $\alpha = 0$ – центр.

Якщо в точці $(x'_0; y'_0)$ – фокус, то в такому разі (залежно від початкових умов) значення p та Q перебувають на замкнутих траєкторіях фазової площини, тобто відбувається коливання цих значень, отже, відповідні їхні значення $(p'_0; Q'_0)$ (відійдемо від значень $(x'_0; y'_0)$) характеризують явище помпажу або виникнення передпомпажних ефектів. Також можливий розвиток коливальних процесів (причому із зростаючою амплітудою) у випадку, коли $(p'_0; Q'_0)$ – нестійкий фокус. В усіх інших випадках відзначається монотонний характер зміни $(p_0; Q_0)$ в околі відповідного положення рівноваги, самі значення p і Q та характеристики компресора (фактично – це фазовий портрет системи (3.16) у відповідних точках (A_1^E, \dots, A_{12}^E)) окремо необхідно вивчити випадки нестійких положень рівноваги не з точки зору можливого помпажу, а з точки зору необмеженого росту (аж до неконкретних значень) величин p і Q часто такі режими є практично нездійсненними [110].

Отже, запропоновано модель визначення зон втрати стійкості розв'язків системи диференціальних рівнянь та встановлено, що явище помпажу корелює з втратою стійкості розв'язків системи, яка описує взаємозв'язок між параметрами (тиск та витрата), контрольованими на діючих компресорних станціях.

Висновки до розділу 3

У результаті проведених експериментально-теоретичних досліджень щодо розроблення нового методу оброблення інформаційних сигналів у САК ПА отримано такі результати:

- теоретично обґрунтовано використання методу багатопараметричного злиття даних у САК ГПА для покращення продуктивності системи оцінювання неточних значень у декількох напрямках, таких як швидкодія, точність, надійність і робастність;
- проаналізовано статистичні характеристики флуктуацій параметрів, що характеризують явище помпажу. У результаті багатопараметричного злиття основних параметрів, що характеризують роботу відцентрового нагнітача газоперекачувального агрегату, отримано сумарний випадковий сигнал, який підпорядковується нормальному закону розподілу, що відповідає твердженню теореми Ляпунова;
- розроблено алгоритм роботи підсистеми антипомпажного захисту “ВН ПІА-ТП” на основі технології злиття даних (Data fusion);
- запропоновано модель визначення зон втрати стійкості розв’язків системи диференціальних рівнянь та встановлено, що явище помпажу корелює з втратою стійкості розв’язків системи, яка описує взаємозв’язок між параметрами (тиск та витрата), контрольованими на діючих компресорних станціях. Встановлено тип кожної із точок положення рівноваги та визначено, як відповідні значення характеризують явище помпажу або виникнення передпомпажних ефектів. Отримані результати можуть бути використані для дослідження передпомпажних коливань та помпажних явищ у відцентрових нагнітачах газоперекачувальних агрегатів дотискувальних компресорних станцій на основі експериментальних даних.

Тематиці розділу III присвячені роботи автора [80], [86], [93], [94], [96], [98], [105], [110].

РОЗДІЛ 4

ОПИС РЕАЛІЗАЦІЇ ЗАПРОПОНОВАНОГО МЕТОДУ ОБ'ЄДНАННЯ ДАНИХ У ЗАДАЧАХ АНТИПОМПАЖНОГО ЗАХИСТУ ВН ГПА ЗА УМОВ НЕВИЗНАЧЕНОСТІ ЗОВНІШНІХ ЗБУРЕНЬ

4.1. Структура автоматичного пристрою виявлення явища помпажу в системі “ВН ГПА - ТП”

Роботи в напрямі створення засобів автоматизації для розв'язання задач захисту і безпеки різних систем (технічних, військових, фінансових, медичних) почалися в 60 – 70-х роках XX століття. Серед перших таких засобів слід назвати Multics, MITRE Security Kernel, UCLA Data secure Unix та ін. [111].

Засоби такого типу потрібні для того, щоб захистити систему “ВН ГПА – ТП” від помпажу без загрози виконання ГПА поставленого завдання. Проблема полягає в тому, що критична інформація для ГПА ДКС ПСГ дуже різноманітна. Тому об'єкти такого типу мають задовольняти певні вимоги.

Відзначимо, що недоліком більшості систем антипомпажного захисту є те, що вони є пасивними, оскільки відстають від початку помпажу на один крок. Тобто в системі спочатку з'являється помпаж, а потім система реагує в напрямку його усунення. У системах антипомпажного захисту ГПА необхідно уникнути такої ситуації або суттєво обмежити її дію. Превентивні міри захисту зобов'язані оберігати інформацію і сам ГПА, а також запобігати появі перед аварійної ситуації. Тобто пристрій автоматичного антипомпажного захисту системи “ВН ГПА – ТП” має задовольняти такі вимоги [111] :

- гарантувати, що функції антипомпажного захисту неможливо обійти або вимкнути;
- функції антипомпажного захисту невеликі і математично підтверджені;
- функції захисту викликаються постійно і регулярно за будь-яких дій прикладних і системних програм;
- функції захисту не можуть бути ані пошкоджені, ані модифіковані.

Реалізацію політики забезпечення безаварійної роботи ГПА, що не задовольняє ці вимоги, вважають неадекватною.

Ми запропонували використовувати ознаковий спосіб виявлення помпажу, коли критерієм близькості помпажу служать обертальний зрив, який виникає раніше від помпажу при зменшенні продуктивності нагнітача і перебуває поруч з межею помпажу. Обертальний зрив (ОЗ) має певні ознаки, що дозволяють визначити його появу і розвиток на тлі інших процесів.

В літературі [112] розглянуто декілька видів обертальний зриву, що виникав у САК ГПА.

Перший вид, який виявив У. Янсен і дослідив Ізмайлов Р. А., а також Я. Сеноо, виникає внаслідок закрученого потоку на торцевих стінках безлопаткового і лопаткового дифузора за деяких малих значень кута входу потоку.

Другий вид обертальний зриву може з'явитися внаслідок відривання потоку при відривальному обертанні решіток робочого колеса лопаткового дифузора та інших решітчастих систем (вхідного направляючого апарата, ребер на всмоктувальному патрубку, обернено – направляючого апарату). Цей вид зриву відрізняється підвищеною швидкістю переміщення зон зриву.

Третій вид обертального зриву лише виникає при протіканні закрученого потоку в зазорі між покривальним диском і торцевою стійкою корпусу.

Власне обертальному зриву іноді передує явище, яке називають “стоячим” зривом, воно виникає у ступені з достатньо високим рівнем окружної нерівномірності і проявляється в створенні зон відриву, які не переміщуються по колу.

Для вирішення завдання виявлення явища помпажу запропоновано модель визначення зон втрати стійкості розв'язків системи диференціальних рівнянь та встановлено, що явище помпажу корелює з втратою стійкості розв'язків системи, яка описує взаємозв'язок між параметрами (тиск та витрата), контрольованими на діючих компресорних станціях. Встановлено тип

кожної з точок положення рівноваги та визначено, як відповідні значення характеризують явище помпажу або виникнення передпомпажних ефектів.

Ми запропонували в системі антипомпажного захисту “ВН ГПА – ТП” використовувати два рівні спрацювання “нижній”, “верхній”:

– якщо встановлено, що тип точок положення рівноваги – стійкий фокус, то діагностується передпомпажний стан ВН ГПА (початок появи обертального зриву);

– якщо встановлено, що тип точок положення рівноваги – нестійкий фокус – то діагностується м’який помпаж стан ВН ГПА (розвиток обертального зриву).

У задачах виявлення важливим елементом є джерело узагальненої інформації 1, яке створює деяку вхідну величину для системи прийняття рішень 2÷4 (рис. 4.1).

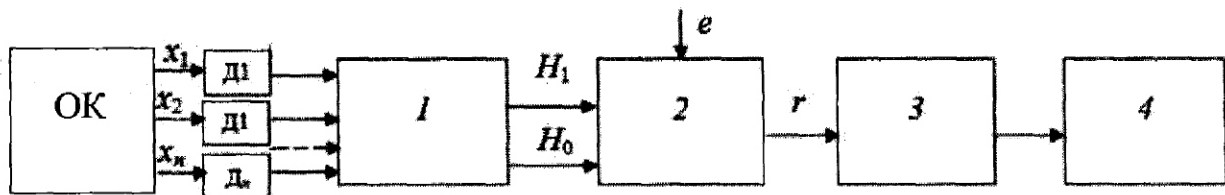


Рис. 4.1. Структура прийняття рішення: $x_1 \div x_n$ – контрольовані параметри;

$Д1 \div Д_n$ – давачі; 1 – джерело узагальненої інформації, що побудоване на засадах DF - технології і використання нормованої автокореляційної функції; 2 – ймовірнісний механізм переходу; 3 – простір спостережень; 4 - правило рішення; e – незалежна дискретна випадкова величина

Ця вхідна величина являє собою результат вибору з двох можливих значень, які можна назвати гіпотезами H_0 і H_1 .

Розглянемо декілька типових механізмів джерел інформації:

– під час виявлення обертального зриву, коли “нижній рівень” гіпотеза H_1 може відповідати тому, що діагностується передпомпажний стан системи

ВН ГПА – ТП”, тоді як H_0 – тому, що триває основний стаціонарний режим роботи системи “ВН ГПА – ТП”,

– під час виявлення обертального зриву, коли “верхній рівень” гіпотеза H_1 може відповідати тому, що діагностується “м’який помпаж” у системі “ВН ГПА – ТП”, тоді як H_0 відповідає тому, що триває процес компримування природного газу без ускладнень і перед аварійних ситуацій.

Проте слід відзначити, що в усіх випадках нам відомо, яка саме гіпотеза є істинною.

Другим елементом задачі виявлення є ймовірнісний механізм переходу, який можна розглядати як деякий пристрій, що знає, яка гіпотеза є істинною. Ґрунтуючись на цьому значенні, він генерує деяку точку в просторі спостережень відповідно до деякого ймовірнісного закону – нормального закону розподілу.

Третім елементом задачі теорії рішень є простір спостережень. Якщо справедлива гіпотеза H_1 , то джерело інформації 1 генерує +1, а коли правильною є гіпотеза H_0 , джерело генерує -1. Проте до вихідної величини джерела додається незалежна дискретна випадкова величина e . Сума вихідної величини джерела і величини e є спостережуваною величиною r . Отже, маємо для двох гіпотез:

$$H_1 : r_1 = 1 + e; H_0 : r_2 = -1 + e. \quad (4.1)$$

Четвертим елементом задачі виявлення є правило рішення. Дійсно, після отримання результату в просторі спостереження нам треба встановити, яка гіпотеза була істинною. Для цієї процедури вводять правило рішення, згідно з яким кожна точка належить до однієї з гіпотез і є точкою в просторі спостережень. Цей простір відповідає N результатів спостережень: r_1, r_2, \dots, r_N . Тому кожний ряд можна представити як точку в N -мірному просторі і позначити вектором \vec{r} :

$$\bar{r} = \begin{pmatrix} r_1 \\ r_2 \\ \vdots \\ r_n \end{pmatrix}. \quad (4.2)$$

Ймовірнісний механізм переходу генерує точки в просторі спостережень у відповідності з двома невідомими умовними густинами ймовірностей

$$P_r|_{H_1} \quad \text{і} \quad P_r|_{H_0}. \quad (4.3)$$

Подальшою метою є використання цієї інформації для вироблення відповідного правила рішення.

Функціонування автоматичної системи виявлення помпажу ВН ГПА ТП є робастним, оскільки на систему не впливають похибки викликані неточними вимірюваннями витрати в колекторі, яка потрібна (витрата) для антипомпажних систем, побудованих на параметричному методі виявлення – особливо на ранніх малих витрат за невисоких чисел Маха.

4.2. Інтелектуальна обробка багатопараметричних даних на основі адаптивної нейро-нечіткої системи виводу в САК ГПА

У наш час все більш поширені інтелектуальні методи обробки нестационарних сигналів за умов невизначеності, що засновані на технологіях обчислювального інтелекту. Такі методи дозволяють розв'язувати великий клас задач обробки інформації й, насамперед, задачі ідентифікації, інтелектуального керування, прогнозування часових рядів довільної природи за умов структурної та параметричної невизначеності.

Останнім часом набули більшого розвитку методу прогнозування за допомогою гібридних систем, в основі яких лежать нечітка логіка, нейронні мережі, генетичний алгоритм та інші нові інформаційні технології [71]. Отже, актуальним є синтез гібридних архітектур та їхніх алгоритмів навчання на основі методів обчислювального інтелекту.

Процес створення нейро-нечіткої адаптивної системи можна умовно розділити на такі етапи: обробка вхідних даних, розроблення системи, перевірка системи.

Під час роботи ГПА виникають рівні звукових сигналів до 200 Па (140 дБ) і вище. Такі рівні звукових тисків призводять до неправильної роботи вимірювальної апаратури і є ознакою можливого руйнування ГПА, оскільки передпомпажні і помпажні явища в ГПА супроводжуються підвищенням звукового тиску. Це висуває важливу задачу контролювання рівнів звукового тиску для урахування шкідливого впливу акустичного шуму ГПА і підпоступу передпомпажного стану [7].

Випробування проводили на газоперекачувальному агрегаті ГПА № 9 ІКС ПСГ “Більче-Волиця” з використанням акустичного сенсору SITRANS AS 00, фірми SIEMENS [113].

Вимірювальний канал забезпечує оброблення інформаційного сигналу, який є адитивною сумою вимірювального сигналу і завад (рис. 4.2.). Проте основним джерелом інформації для розв’язання поставленої задачі контролювання є шуми в ГПА, що супроводжують явище помпажу.

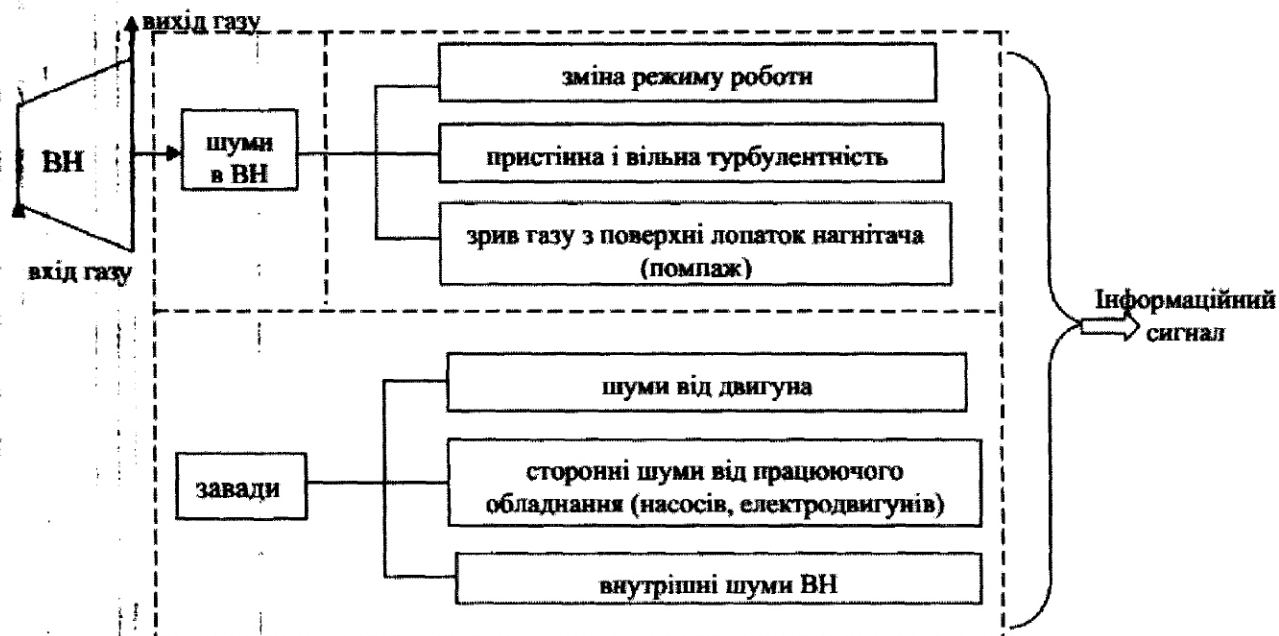


Рис. 4.2. Складові акустичного інформаційного сигналу ГПА

Як вхідні дані використано дані про зміну в часі звуку на вході в ГПА (L1), на тілі ГПА (L2) і на виході ГПА (L3), отримані на працюючому ГПА № 9 ДКС ПСГ «Більче-Волиця» (рис. 4.3) [113].

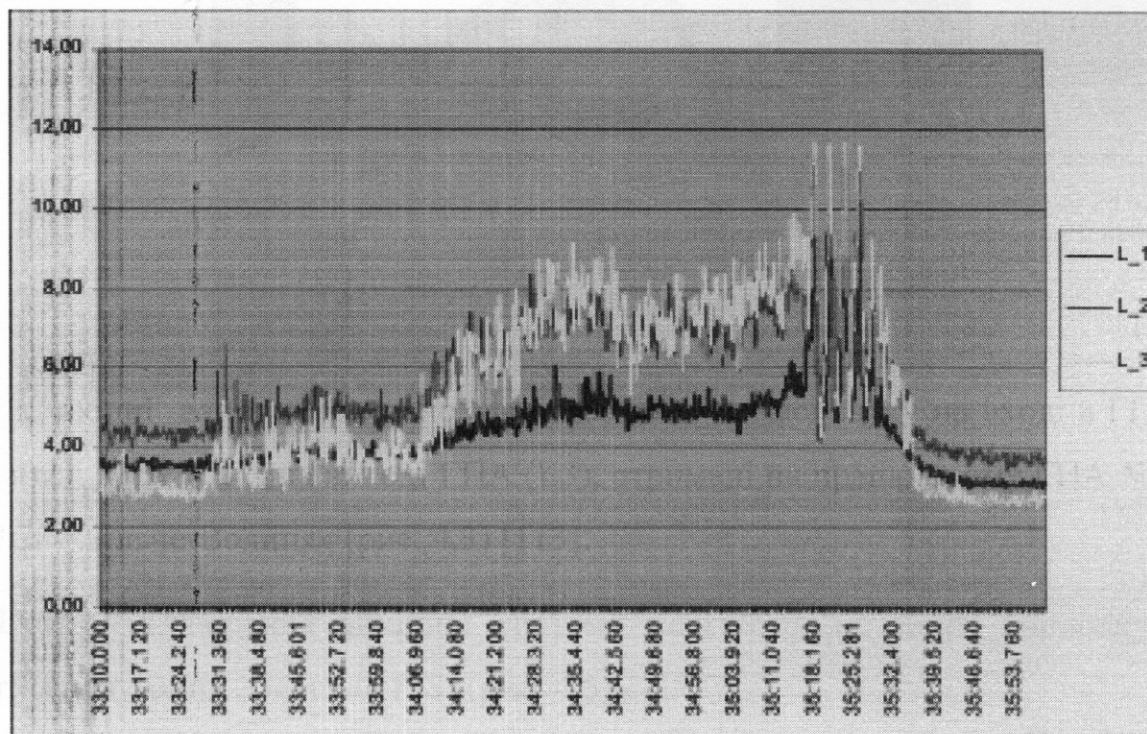


Рис. 4. 3. Графіки зміни в часі звуку на вході в ГПА (L1), на тілі ГПА (L2) і на виході ГПА (L3)

Після проведення оцифровування графіків з використанням програми Graph2Digit, отримали три параметри, які будуть використані як вхідні сигнали та суму трьох вхідних сигналів – вихідного параметра [75].

Методика створення нечіткої нейронної мережі ANFIS, призначеної для прогнозування роботи ГПА, в середовищі Matlab така [114].

Етап 1. Запуск ANFIS-редактора.

Етап 2. Завантаження навчальної вибірки: в області завантаження даних (LoadData) вибір типу даних, наприклад, навчальна вибірка (Traning) та натиск на кнопку «LoadData» (рис. 4.4).

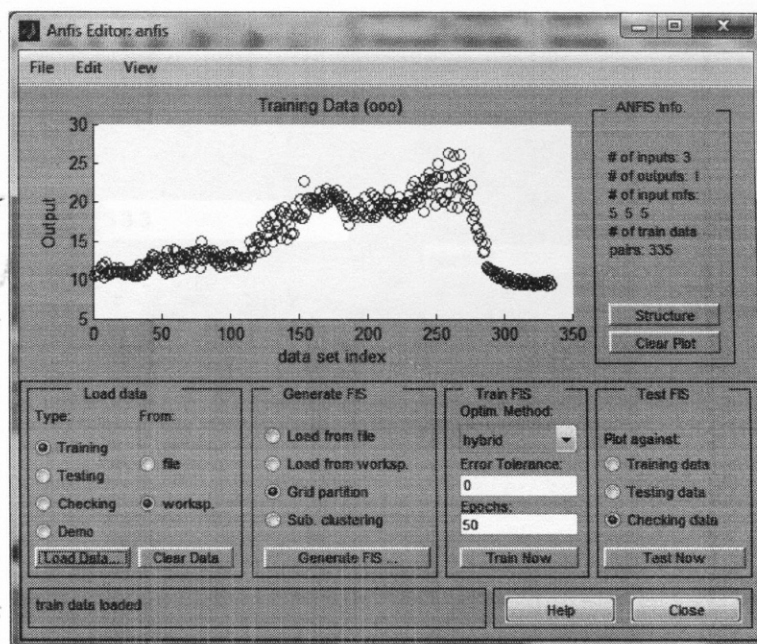


Рис. 4.4. Завантаження навчальної вибірки в ANFIS-редакторі

Етап 3. Створення вихідної системи нечіткого логічного висновку в області генерування (Generate FIS) (рис. 4.5):

– вибір способу створення системи – генерування системи за методом решітки (Grid partition), без кластеризації (метод Sub. Clustering використовується для побудови систем з функціями кластеризації);

– введення кількості термів для кожної вхідної змінної у вікні введення параметрів – 3 вхідних змінних, кожна має три терми;

– введення типу функцій належності для вхідних і вихідній змінних у вікні введення параметрів – вхідні параметри мають дзвоноподібну функцію належності (gbellmf); вихідний параметр – лінійний.

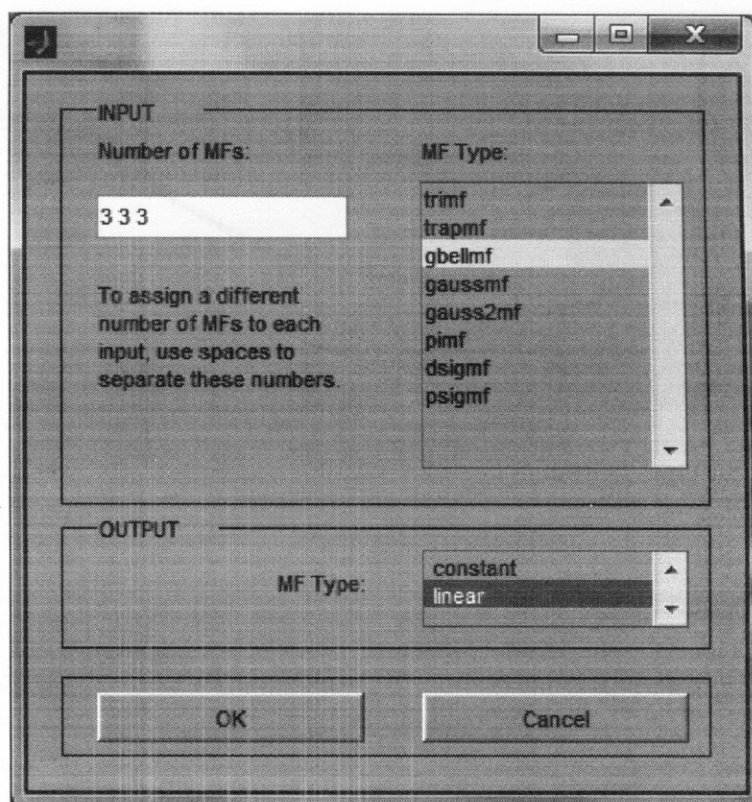


Рис. 4. 5. Вікно вибору функцій належності, кількості термів

Етап 4. Виконання навчання мережі в області навчання (Train FIS):

- вибір методу оптимізації (Optim. Method) – гібридний метод, який об'єднує метод зворотного поширення помилки з методом найменших квадратів (hybrid);
- завдання поля необхідної точності навчання (Error tolerance) – 0;
- поле завдання кількості ітерацій навчання (Epochs) – 50 epochs;
- запуск режиму навчання (Train Now) (рис. 4.6).

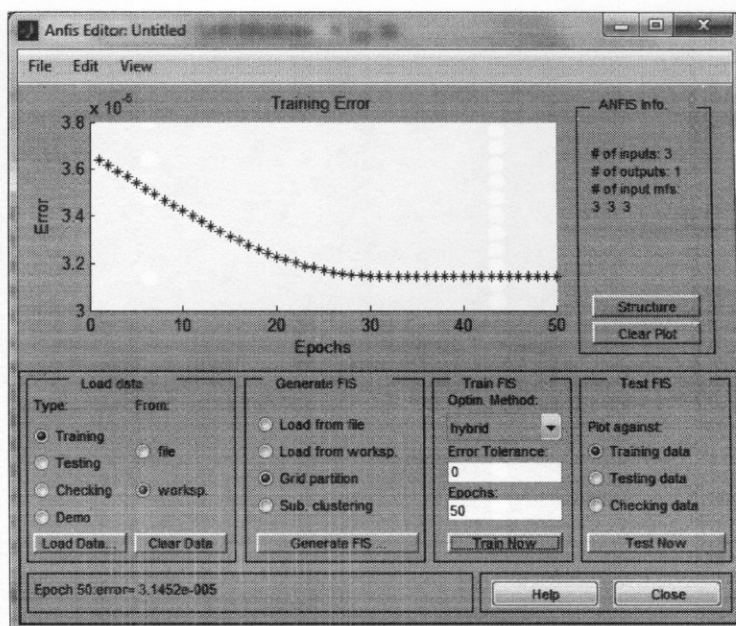


Рис. 4.6. Зміна величини помилки залежно від кількості ітерацій

Етап 5. Тестування нечіткої системи з виведенням результатів в область візуалізації: в області тестування (Test FIS) вибору вибірки, запуск тестування (Test Now) (рис. 4.7).

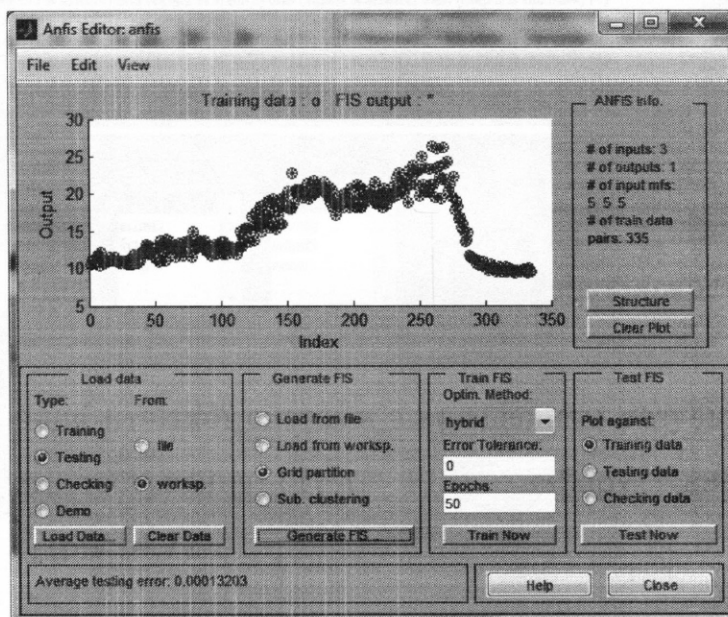


Рис. 4.7. Результати навчання системи

На основі статистичних вибірок експериментальних даних генеруємо структуру нейро-нечіткої мережі та продукційну модель знань (рис. 4.8 і рис.4.9).

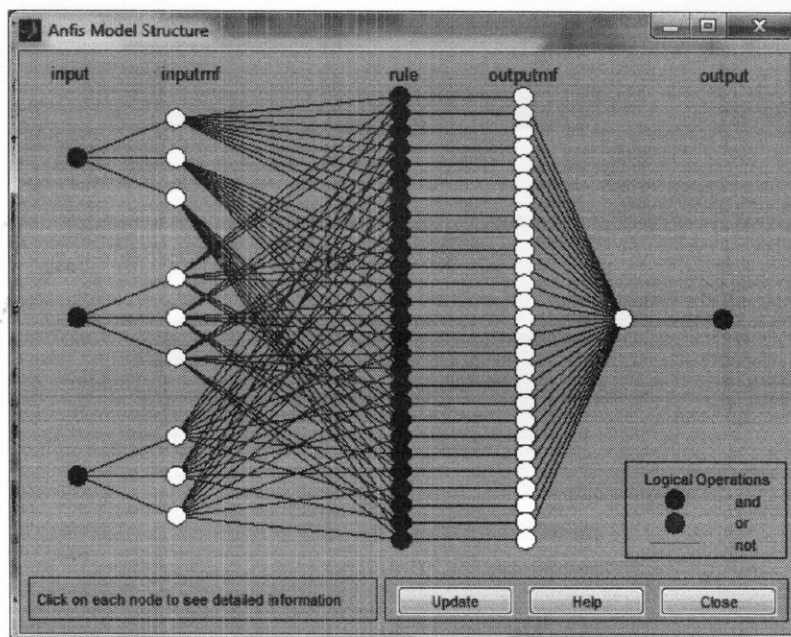


Рис. 4. 8. Структура нейро-нечіткої мережі, в якій відображено основні зв'язки

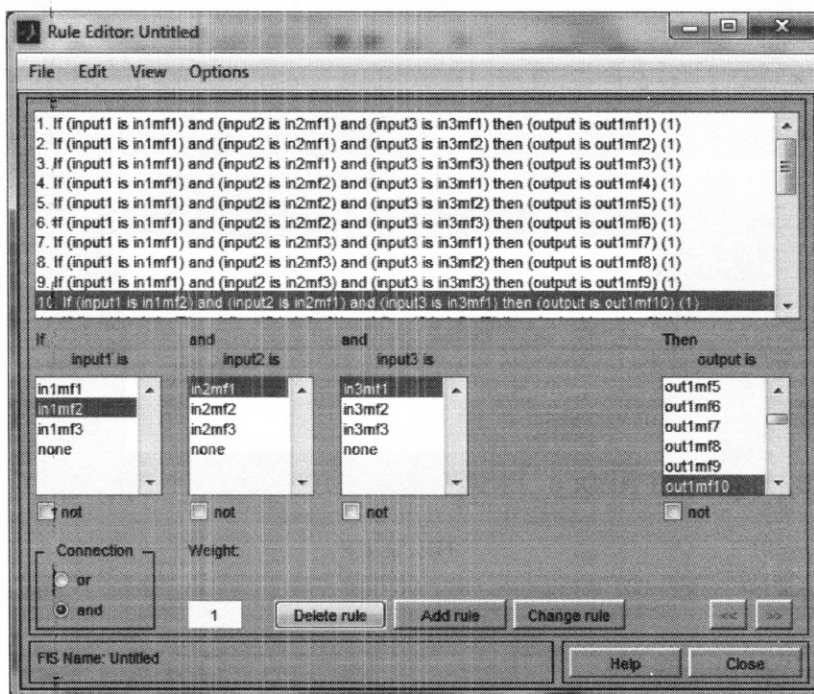


Рис. 4.9. Згенерована продукційна модель знань

Результати попереднього тестування системи показані на рис. 4.10.

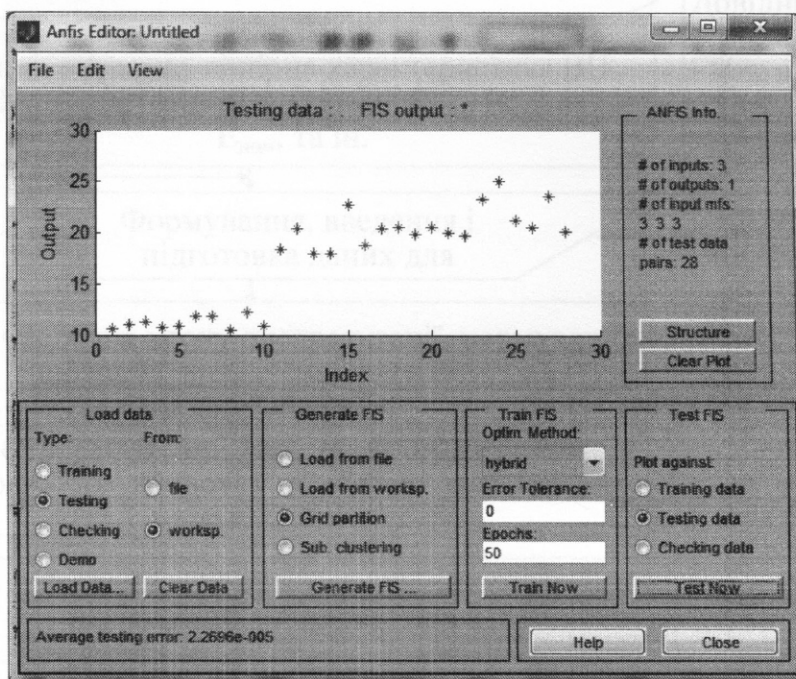


Рис. 4.10. Результати попереднього тестування системи

Результати перевірки системи наведені на рис. 4.11.

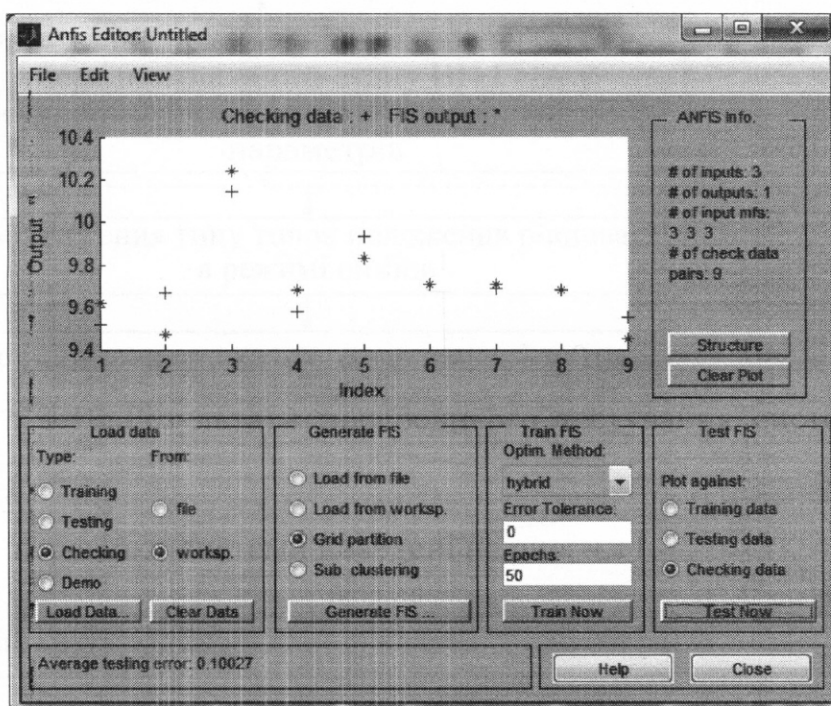


Рис. 4. 11. Результати перевірки системи

Максимальна похибка при перевірці мережі склала 0,1.

Розроблено алгоритм роботи підсистеми антипомпажного захисту “ВН ППА – ТП” (рис. 4.12).

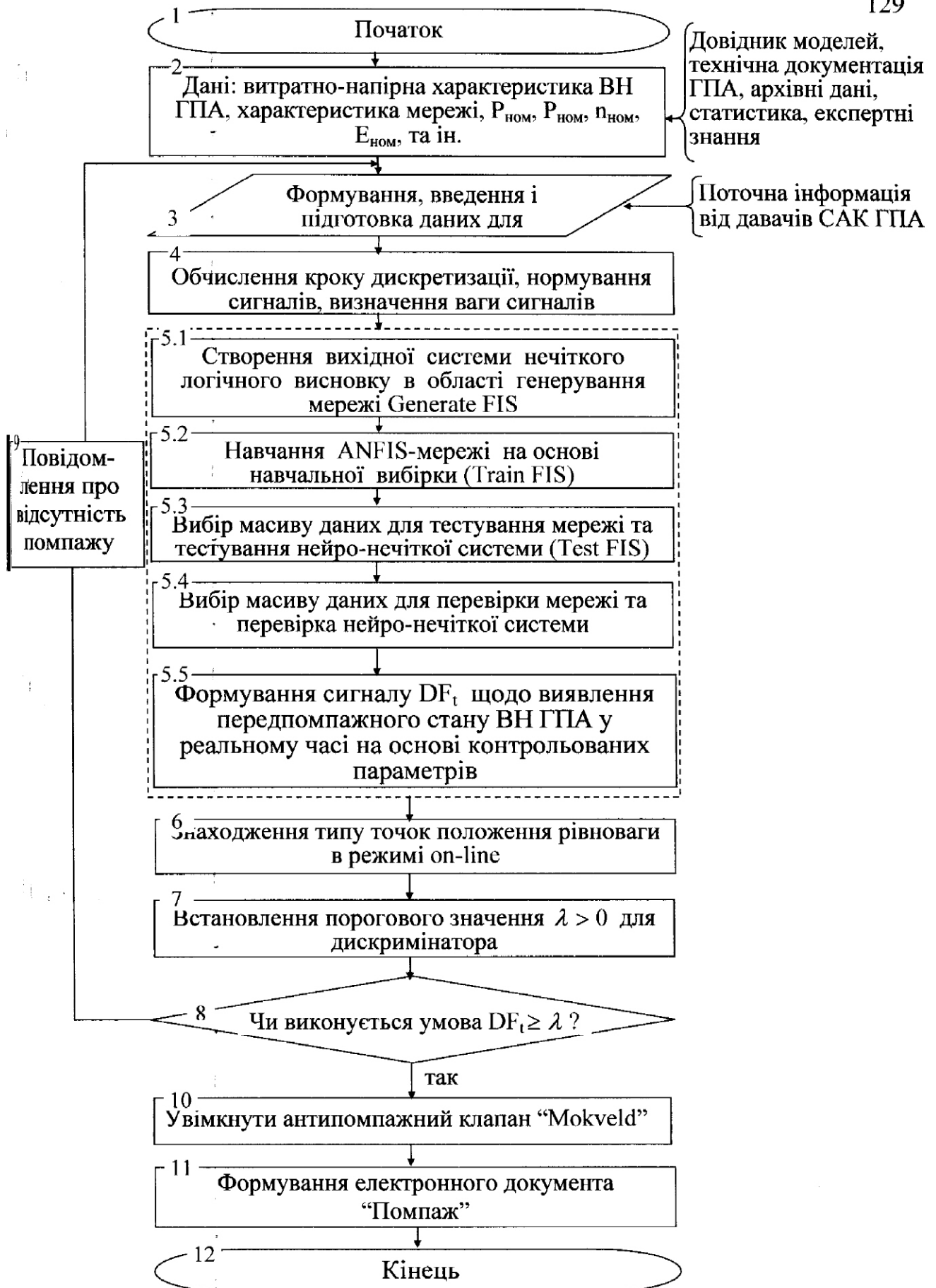


Рис. 4.12. Алгоритм роботи підсистеми антипомпажного захисту "ВН

Отже, проаналізувавши існуючі архітектури нейронних мереж, які придатні для прогнозування станів ВН ГПА, визначними, що значними перевагами виділилась гібридна ANFIS, що поєднує в собі переваги нейронних мереж і систем нечіткого виводу. При побудові нейронечіткої системи виконано дослідження можливих структур і обрано 3-входову систему з використанням алгоритму Такгі-Сугено. Така система відрізняється своєю простотою й дозволяє обробляти інформацію в onlin-режимі в міру її надходження

4.3. Інформаційна технологія раннього виявлення відхилення процесу компримування газу від нормальних робочих характеристик

На жаль, Україна експлуатує застаріле обладнання компресорних станцій, оскільки залишається на периферії інвестиційних потоків. Це значною мірою спричиняє підвищення аварійності обладнання. З огляду на це, гостро постала проблема вироблення наукових засад щодо сучасного методу виявлення відхилень процесу компримування газу від нормальних робочих характеристик, що адаптований до світових стандартів і враховує вітчизняну специфіку.

Залишаються питання, пов'язані зі створенням методів раннього виявлення відхилень технологічного процесу компримування газу від нормальних робочих характеристик, залишається дотепер актуальними.

Раннє виявлення відхилення процесу (РВВП) сьогодні використовується для захисту обладнання і процесів від пошкоджень та захисту процесу від виходу за межі нормальної роботи [115, 116]. Сигналізація, використовувана для захисту обладнання і процесу, часто активізується занадто пізно, щоб оператор розпочав діяти і вимкнув обладнання. Проте за допомогою on-line технології збору і обробки даних порушення в роботі можуть бути виявлені до спрацювання сигналу тривоги. У деяких галузях промисловості західних країн такі технології РВВП вже використовуються.

Процес компримування газу теж має багатовимірний характер і система РВВП має аналізувати головні компоненти для виявлення відхилень у межах даних, що належать до багатовимірних вимірювань.

Дані нормальної роботи ГПА використовують для створення моделі. Поточні значення порівнюють із цією моделлю для визначення того, чи перебувають поточні значення в межах або за межами нормального режиму експлуатації ГПА. Для цього додаткові вимірювання не потрібні, але може бути використаний квадрат похибки між поточними даними окремих сигналів та вихідними даними моделі

$$e = \sum_k [b_k(k) - b_m(k)]^2, \quad (4.11)$$

де b_k – контрольований в режимі on-line параметр на виході об'єкта;

b_m – значення параметра, що отримане в результаті розв'язку моделі;

k – дискретний час.

Якщо це значення стає високим, то це означає, що поточна операція сильно відрізняється від еталонної моделі і це – не нормально. Оператор оповіщається про потенційну проблему – у цьому випадку передпомпажне явище.

Існує [143] чотири кроки для застосування РВВП в режимі on-line в АСК ГПА:

- визначення вимірювальних параметрів, тобто головних компонент, що характеризують помпаж;
- створення моделі процесу “норма-вимога”;
- налаштування каналу зв'язку;
- налаштування інтерфейсу.

АСК ГПА – багатофункціональна, багатоканальна система довгострокового використання, що має керувати роботою ГПА без постійної присутності обслуговувального персоналу.

Таке дослідження передбачає розвиток області застосування методу фазових траєкторій на системи раннього виявлення відхилень процесу роботи

ПА, які у зв'язку з наявністю нелінійних витратно-напірних характеристик можуть бути віднесені до класу нелінійних систем.

Відображення руху системи на фазовій поверхні, а також використання граничних циклів, дозволяє для таких систем, що описані диференціальними рівняннями другого порядку, отримати досить прості, зручні в інженерній практиці фазові портрети, які характеризують стійкість системи і якість перехідних процесів.

Метод фазових траєкторій є графоаналітичним способом дослідження нелінійних систем. Сутність методу полягає в описі поведінки досліджуваних нелінійних систем за допомогою фазових траєкторій, тобто кривих у фазовому просторі, що відображає еволюцію фізичної системи. Сукупність фазових траєкторій, побудованих для різних початкових умов, складає фазовий портрет.

Фазові портрети служать для наочного відображення особливостей еволюцій динамічної системи: особливих точок, граничних циклів. Для двовірної системи фазовий портрет повністю відображає типи траєкторій, які можуть реалізовуватись.

Оскільки вільний рух нелінійної динамічної системи керування з одною керованою величиною $x(t)$ у загальному випадку можна описати за допомогою n диференціальних рівнянь першого порядку [84]

$$\frac{dx_j(t)}{dt} = f_j[x_1(t), x_2(t), \dots, x_j(t), \dots, x_n(t)] \quad (j=1; 2; \dots, n), \quad (4.12)$$

де $x_1(t) = x(t)$; $x_2(t) = \dot{x}_1(t)$; ...; $x_{j+1}(t) = \dot{x}_j(t)$; $x_n(t) = \dot{x}_{n-1}(t)$ – фазові змінні стану, тоді миттєвий стан системи і її подальша поведінка однозначно визначені, якщо в момент $t = t_i$ відомі значення усіх n змінних x_j .

Ці значення можна розглядати як координати зображувальної точки x_1, x_2, \dots, x_n у n -мірному фазовому просторі. Оскільки конкретним початковим умовам $x_1(0) = x_{10}$; $x_2(0) = x_{20}$; ...; $x_n(0) = x_{n0}$ відповідає єдине рішення системи (4.12), тобто певна сукупність шуканих функцій часу $x_1(t), x_2(t), \dots, x_n(t)$, то кожній групі початкових умов відповідає лише одна початкова точка і єдина

фазова траєкторія, а множині груп початкових умов відповідає ціле сімейство траєкторій, тобто фазовий портрет.

Якщо в лінійних системах такий стан лише один, то в нелінійних, якою є САК ГПА, їх може бути декілька і, отже, на фазовому портреті може бути декілька особливих точок M_1, M_2, M_3, \dots

Завданням дослідження є не тільки визначення місця особливих точок, але й встановлення факту їхньої стійкості або нестійкості.

Оскільки характер фазової траєкторії навколо особливої точки нелінійної системи, що визначає її тип, залежить від характеру коренів характеристичного рівняння (4.44). Існує шість типів особливих точок нелінійних систем [116]:

- особлива точка типу “центр”;
- особлива точка типу “стійкий фокус”;
- особлива точка типу “нестійкий фокус”;
- особлива точка типу “стійкий вузол”;
- особлива точка типу “нестійкий вузол”;
- особлива точка типу “сідло”.

Для помпажних явищ у системі “відцентровий нагнітач газоперекачувального агрегату – трубопровід” фазова траєкторія має вигляд спіралі, що розкручується, і зображувальна точка M рухається від початку координат, тобто особлива точка є “нестійким фокусом”.

Щодо стосується фазового портрету САК ГПА загалом, то він має єдину стійку особливу точку 0 (рис. 4.14), тому і система стійка.

Проте граничний цикл M_1, M_2 нестійкий, оскільки звичайні траєкторії відходять від нього як із середини так і ззовні. Зображувальна точка M наближається до особливої точки 0 лише тоді, коли її початкове положення перебуває в заштрихованій області, обмеженій граничним циклом M_1, M_2 .

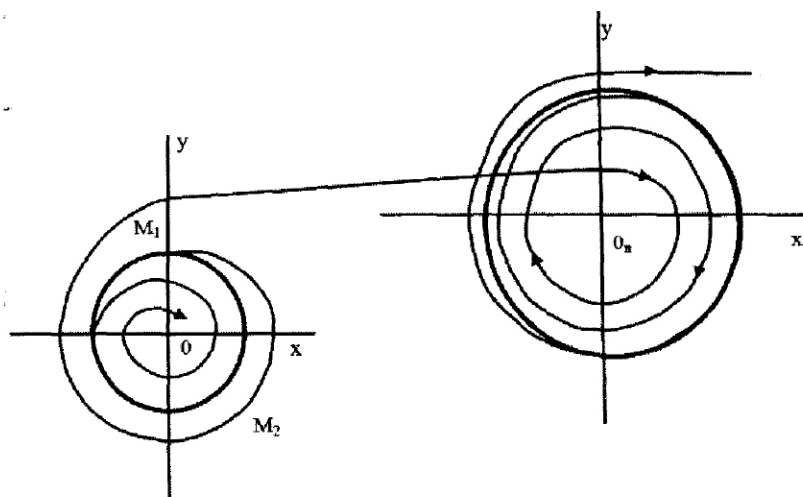


Рис. 4.14. Фазовий портрет САК ГПА з особливою точкою в початку координат і двома граничними циклам

Якщо ж початкове положення зображувальної точки M перебуває в незаштрихованій області фазової площини, то тоді точка M буде рухатись від граничного циклу і точки O . Тому область “атрактор тяжіння” особливої точки O обмежена і не охоплює усієї фазової площини. Отже, система, з фазовим портретом (рис. 4.14) стійка в малому, а граничний цикл M_1, M_2 є нестійким. Він є межею, яка відокремлює один тип фазових траєкторій від іншого – того, що описує явище помпажу.

Відзначимо, що фазові портрети дають певні уявлення про динаміку нелінійних систем другого порядку при детермінованих збуреннях, зокрема про точність, стійкість і якість процесів. Як координати фазових портретів використали відхилення x_i контрольованих величин від їхніх значень, що відповідають усталеному режиму роботи САК ГПА, і їхні перші похідні

$$y_i = \frac{dx_i}{dt}.$$

Для моделювання фазових портретів досліджуваних параметрів 2 режимі on-line використали програму Matlab Simulink і схему, що наведена на рис. 4.15 [115].

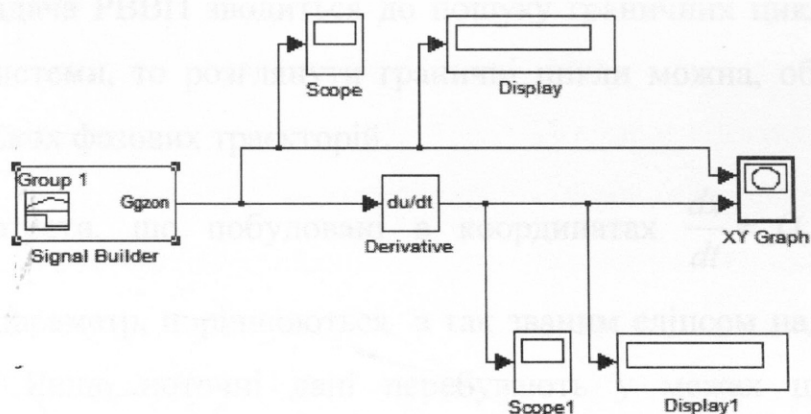


Рис. 4.15. Моделювання фазових портретів у системі Simulink

Приклад фазового портрету для одного з параметрів $E(t)$ наведено на рис. 4.16.

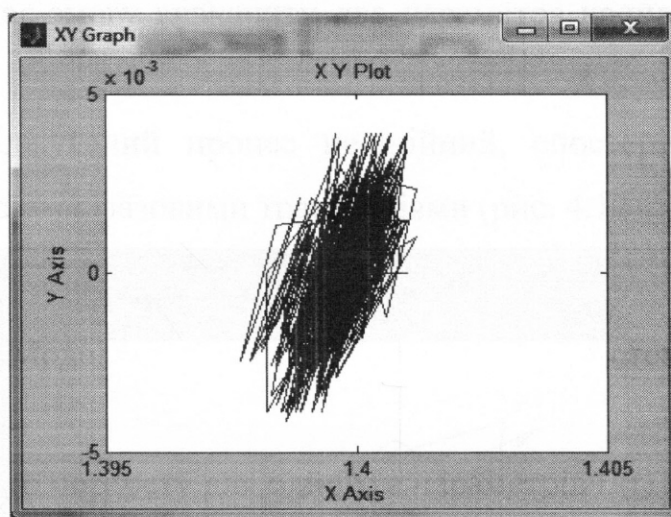


Рис. 4.16. Приклад побудови фазового портрету ступеня підвищення тиску газу E

Аналізування отриманих фазових портретів дозволило встановити, що усталеному режиму відповідають фазові траєкторії, що сходяться до фокуса, яким є середнє значення контрольованого параметра. Нестійкому процесу відповідає траєкторія, що іде від початку координат.

Оскільки задача РВВП зводиться до пошуку граничних циклів залежно від параметрів системи, то розглянути граничні цикли можна, обмежившись побудовою декількох фазових траєкторій.

Фазові портрети, що побудовані в координатах $\frac{dx}{dt} = f(x)$, де x – контрольований параметр, порівнюються з так званим еліпсом надійності або надійних даних. Якщо поточні дані перебувають у межах цього еліпса надійності $ax^2 + by^2 = 1$, то представлення процесу компримування газу класифікується як “норма”. Після того, як точка фазового портрету виходить за межі еліпса, його класифікують як “передпомпажне явище” або “аномалія”.

Досліджуваний процес нестійкий, оскільки в режимі жорсткого помпажу фазові портрети відходять від еліпса надійності (атрактора) і створюють інший аттрактор. Аттрактор дає змогу визначити два параметра коливального циклу – частоту і амплітуду.

Оскільки досліджуваний процес нелінійний, спостерігається декілька областей з різноманітними фазовими траєкторіями (рис. 4.17).

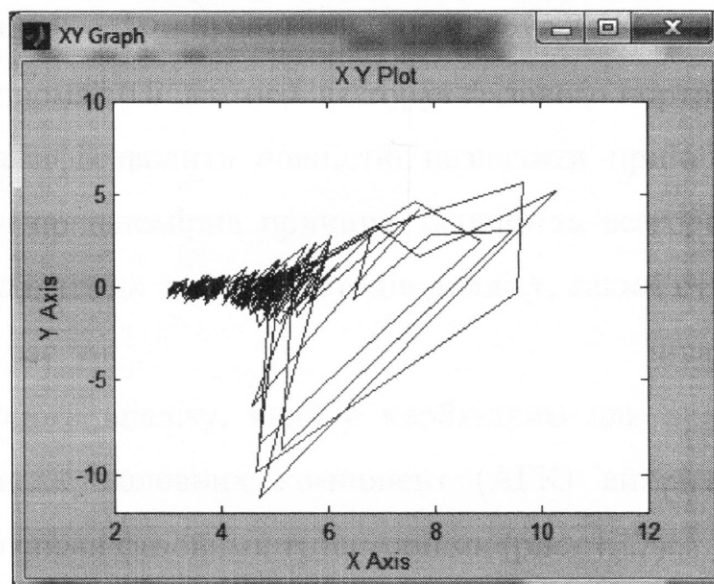


Рис. 4.17. Приклад фазового портрету акустичного сигналу A_k

Відзначимо, що якщо пізніше з'ясується, що отримані дані не характеризують передпомпажний стан ГПА, то їх можна включити до моделі

нормальних даних для покращення даної моделі і уникнення можливих хибних тривог. Можливість повторної класифікації даних є важливою для запобігання хибних спрацювань системи захисту ГПА. Оскільки логіка виявлення передпомпажного стану системи “відцентровий нагнітач газоперекачувального агрегату – трубопровід” досить складна, то для визначення кінцевої причини аномальної ситуації треба застосувати комплексний аналіз прийняття рішення про необхідні дії. У зв’язку з цим будь-який новий аналіз має проводити досвідчений інженер, або фахівець з автоматизації.

Другий крок для застосування інформаційної технології РВВП полягає в створенні моделі процесу “норма-вимога”. Для виявлення сприяльних змінних щодо виявлення явища помпажу використані архівні дані – діаграми основних компонент $P(t)$, $N_{ct}(t)$, $dP_{конф}(t)$, $G_{gzon}(t)$, $G_{vzon}(t)$, $G_{szsuv}(t)$, $G_{gpon}(t)$ та ін. Для перегляду даних запропоновано систему візуалізації паралельних координат (ВПК), яка є дуже корисною і визначає будь-які одномірні причини передпомпажних явищ.

Рис. 4.18 є одним і основних інструментів перегляду параметрів, що надають операторові інформацію про помпаж. Схема ВПК є одномірним, але дуже корисним інструментом для перегляду усіх даних. Проте малоймовірно, що одномірний аналіз дозволить повністю визначити причини порушень у роботі ГПА і будь-яка одномірна причина, скоріш за все, буде виявлена за допомогою перегляду інших даних і методів аналізу, таких як часова область змінних.

Для багатомірного аналізу, який є необхідним для виявлення причин появи помпажу, аналіз головних компонент (АГК) використовується для пошуку змінних, що сприяють порушенню працездатності ГПА.

Експерт повинен вибрати кількість головних компонент (ГК), що характеризують мінливість процесу і сприяють вимірюванням. Це здійснюється також в автономному режимі. Вибір кількості ГК є важливим фактором отримання результативного аналізу даних. У рамках аналізу в автоматичному режимі використовують [118] також інші графічні матеріали

для остаточного визначення причини порушень у роботі: тенденції прямих відрізків, тенденції *cusum*, схеми змінних значень, множинні схеми та ін.

Тendenції прямих відрізків показують змінні значення часових рядів, схеми *cusum* відображають точки змінних значень. Точність аналізу прямих відрізків може бути вибрана для оцінювання основних точок змін і їхнього порівняння з точками змін вимірюваного параметра. Аналізування прямих відрізків є потужним інструментом в оцінюванні областей значень змін і визначення змінних.

Для оперативного аналізу поточні значення процесу, що були визначені для вимірювання параметра, порівнюються з протестованими моделями для виявлення значень змінних у цьому модельному ряду (рис. 4.18).

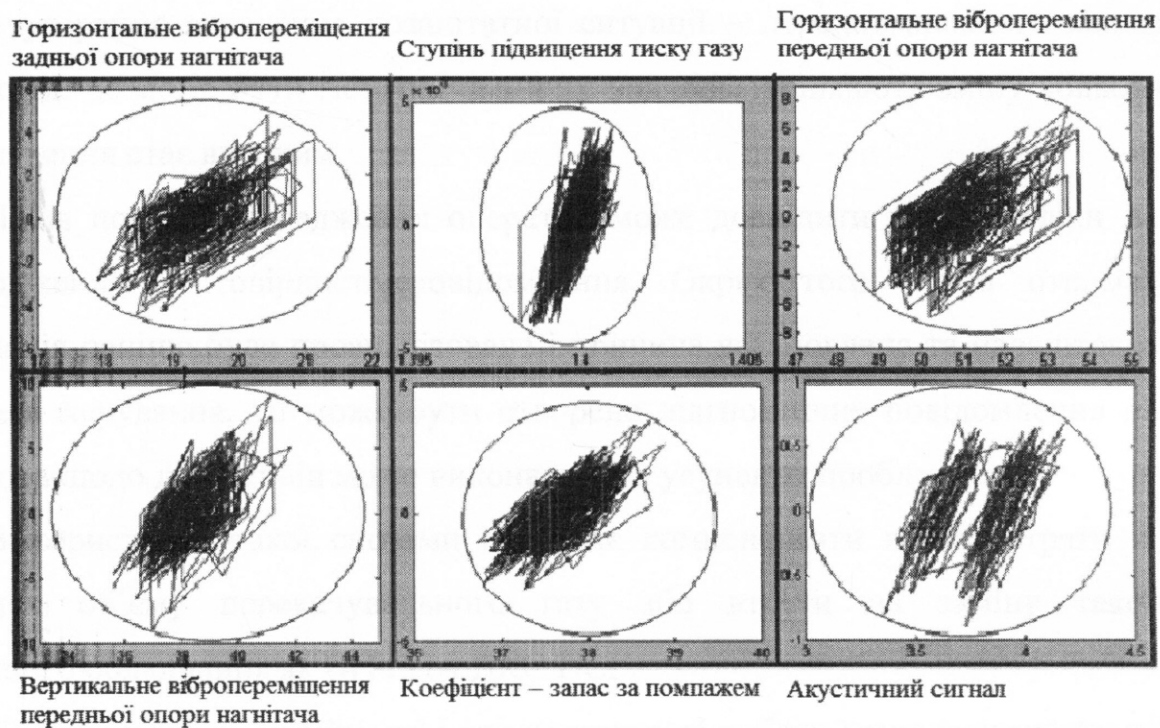


Рис. 4.18. Фазові портрети

Наступний крок – це створення каналу зв'язку для передачі даних у режимі online і їхнім використання для аналізу. Дані повністю передаються на робочу станцію оператора з використанням стандарту передачі даних у режимі реального часу (OPC).

Операція, яку в майбутньому оцінюють як бажану, легко вводять в модель для запобігання непотрібних повідомлень у майбутньому. Після утворення каналу зв'язку необхідно задати спосіб попередження оператора про початок явища помпажу. Оповіщення про несправності можуть створюватися за допомогою sms- повідомлень на мобільний телефон інженера, що відповідає за процес, або на ПК відповідального інженера, або у вигляді текстового повідомлення на робочу станцію оператора. Коли процес наближається до зони попередження помпажу, попередження шляхом сигналізації або просто графічної зміни кольору передаються на робочу станцію оператора, щоб попередити оператора про те, що вимірювання відрізняється від бажаного значення. Це повідомлення з'являється до спрацювання сигналізації, що забезпечує раннє виявлення позаштатної ситуації – передпомпажного явища. Наприклад, це може бути гістограма з межами, які викликають зміну кольору, коли значення стає високим.

Після появи попередження оператор може дослідити різні графіки для підтвердження достовірності повідомлення. Окрім того, якщо отримана інформація раніше була проаналізована і причина встановлена та налаштована в системі керування, то може бути створене діагностичне повідомлення для оператора щодо дій, які він може виконати, для усунення проблеми.

Використання такої системи дозволяє компенсувати великі втрати від зниження об'єму перекачувального газу або втрати на заміну такого критичного обладнання як ВН ГПА ДКС ПСГ.

Для оптимізації, надійності і продуктивності роботи газоперекачувальних агрегатів дотискувальних компресорних станцій підземних сховищ газу, а також досягнення найбільшої їхньої ефективності шляхом своєчасного виявлення явища помпажу, запропоновано інформаційну технологію раннього виявлення відхилення процесу компримування газу від нормальних робочих характеристик, що основана на аналізі фазових портретів контрольованих параметрів. Ці зміни можуть бути використані для активізації сигналізації, що дає оператору певний час для прийняття керувальних дій. Для ефективного

застосування системи раннього виявлення явища помпажу вона має бути незалежною від САК ГПА та інших газоперекачувальних агрегатів.

4.4. Удосконалення функціональної структури системи автоматичного антипомпажного захисту, що реалізує спосіб захисту ГПА від помпажу на засадах інформаційної технології Data Fusion

Для удосконалення функціональної структури САК ГПА, що реалізує запропонований метод антипомпажного захисту були використані ті самі схемо-технічні рішення, принципи та підходи, що застосовуються в існуючій системі автоматичного керування газоперекачувальним агрегатом Ц-6,3 [119].

В основу функціональної структури удосконаленої САК ГПА-Ц-6,3 покладено технологію об'єднання даних (Data Fusion), що описана в розділі 3 (рис. 4.19).

У функціональній структурі системи (рис. 4.19) установлені такі зв'язки між елементами системи. Виходи групи датчиків з'єднані з відповідними входами АЦП, виходи якого підключені до системної шини СШ, до якої також підключені вхід формувача вихідного сигналу керувальної дії, вхід індикатора режиму роботи ГПА і системи раннього виявлення відхилень процесу, вхід та вихід центрального процесора і вхід ЦАП.

Група датчиків забезпечує вимірювання параметрів режиму роботи компресора і параметрів газу на вході, а також вібрації передньої і задньої опор відцентрового нагнітача (додаток В).

АЦП перетворює вихідні сигнали датчиків у цифрову форму. Системна шина забезпечує зв'язок між усіма блоками система антипомпажного регулювання і захисту.

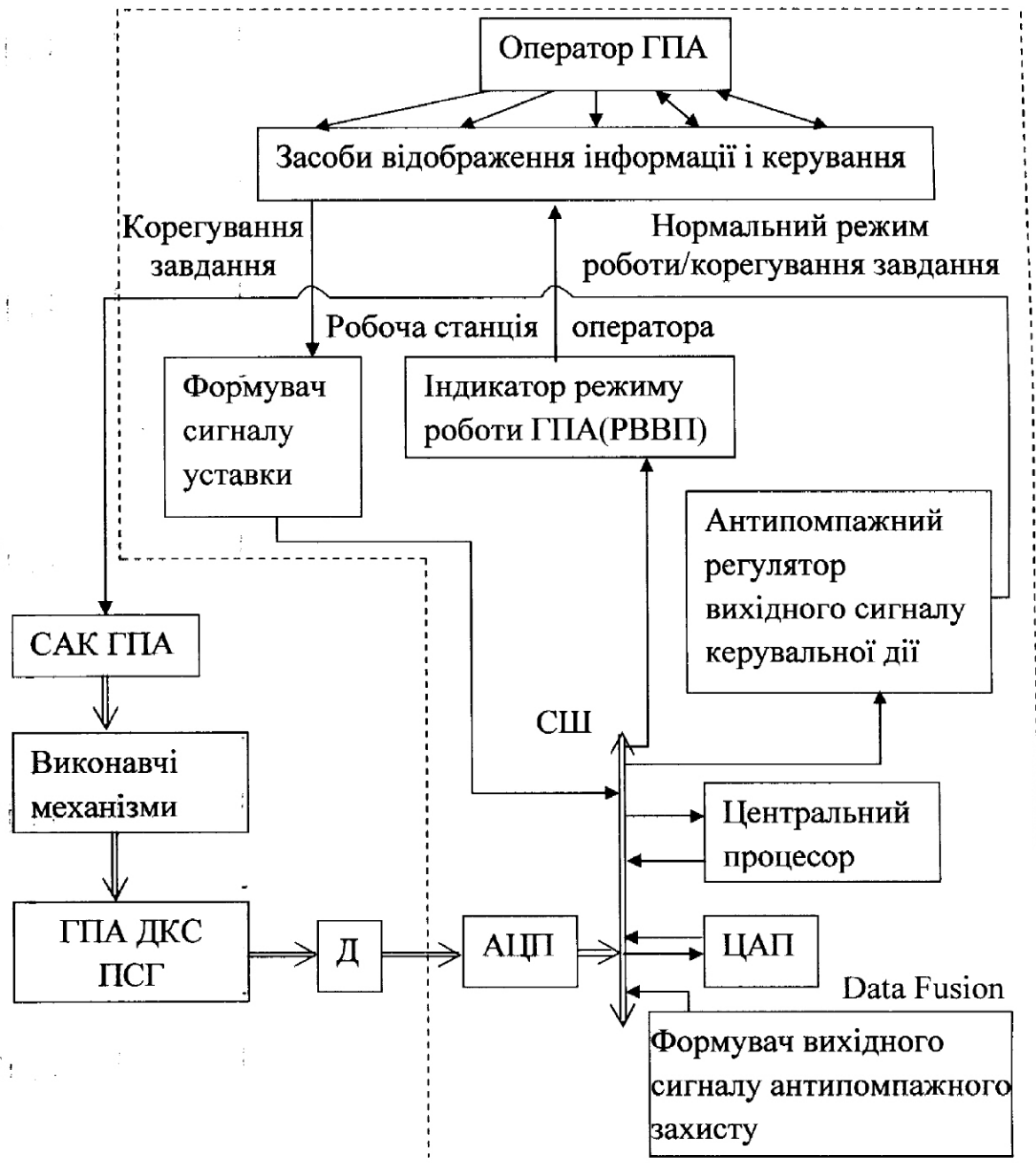


Рис. 4. 19. Функціональна структура системи антипомпажного регулювання, що реалізує спосіб захисту ГПА від помпажу на засадах технології Data Fusion: Д – давачі, СШ – системна шина

Процесор реалізує алгоритм роботи системи, формувач вихідного сигналу керування виробляє сигнал для САК ГПА щодо підвищення або зниження швидкості обертання компресора, формувач вхідного сигналу здійснює перетворення керувального дискретного сигналу у цифрову форму. Ця група елементів антипомпажного регулятора може бути реалізована із застосуванням

програмувального логічного контролера (наприклад GE Fanuc фірми “General Electric” (США)).

Контур антипомпажного захисту виконує два основні завдання: забезпечує нормальний режим експлуатації ГПА та раннє виявлення порушень працездатності ГПА (передпомпажного стану) на засадах технології Data Fusion.

Він може бути реалізований на основі сигналізатора помпажу CompactLogix виробництва Allen-Bradley (США). До процесора 1769-L20 (-L30,- L35E) приєднані модулі вхідних-вихідних сигналів серії 1769 у кількості, яка залежить від типу компресорної установки і складності задачі, що виробляються [121].

Для конфігурування контролера CompactLogix використовують програмний пакет RLD700ENE Professional

1. RSLogix5000 – 32-розряди ПЗ для Windows NT, побудував стратегії керування який містить LadderLogic, Functional Block Diagram, Sequential FunctionChart, Structureal Text .

RSLogix має такі характеристики;

- online та offline – програмування;
- компонування і конфігурування модуля введення – виведення;
- інформація про перехресні посилання;
- тренди;
- розширене виявлення пошкоджень.

2. RSLinx – конфігураційне програмне забезпечення, яке призначене для зв'язку RSLogix5000 з контролером, а також організації через OPO-, DDE-, Advance DDE сервери зв'язку програм верхнього рівня (SCADA та ін.) з програмованими контролерами.

Отже, відповідно до мети створення, САК ГПА містить у собі функціональні підсистеми контролю технологічного процесу компримування

газу та стану устаткування, автоматичного керування та антипомпажного захисту, оперативного контролю та керування.

Перші дві підсистеми вирішують завдання нижнього рівня дворівневої структури САК ГПА, а підсистема оперативного контролю та керування призначена для вирішення завдань верхнього рівня.

Підсистема контролю технологічного процесу компримування газу та стану устаткування призначена для введення та виведення аналогових та дискретних сигналів відповідно до заданого періоду опитування та виконання необхідних видів обробки: фільтрування, лінеаризування, масштабування, контролювання на порушення меж, перевірки на вірогідність інформації, введеної від аналогових первинних вимірювальних перетворювачів.

Підсистема автоматичного керування та антипомпажного захисту призначена для керування виконавчими механізмами ГПА на всіх режимах роботи та виконання автоматичних операцій із зупину ГПА з аварійною сигналізацією та вимкненням устаткування. Аварійний зупин ГПА здійснюється під час виявлення підсистемою аварійного значення параметра захисту, зокрема під час виявлення автоколивань у системі “ВН ГПА – трубопровід”, викликаних початком явища помпажу.

У системі забезпечений пріоритет дії технологічних захистів та блокування перед усіма іншими командами керування.

Окрім цього, передбачена можливість запуску виконавчих команд захистів (наприклад, аварійний та екстрений зупин ГПА) оператором ГПА. Усі інші можливості втручання оператора в роботу захистів заборонені або заблоковані.

Підсистема оперативного контролю та керування призначена для створення оптимального інтерфейсу оператора ГПА із САК ГПА, а також – забезпечення адекватної і достовірної оцінки роботи ГПА й оперативного прийняття рішень з керування.

Представлення інформації оператору ГПА відбувається у простій та наочній формі з ієрархічним простежуванням і детальною інформацією за кожним окремим параметром у вигляді мнемосхем, графіків, цифрових значень, текстових повідомлень на екрані монітора. Виклик інформації на екран монітора здійснюється за допомогою сенсорного екрана.

Окрім цього, підсистема оперативного контролю та керування забезпечує архівацію технологічних параметрів САК ГПА, а також обмін інформацією з системою керування верхнього рівня – автоматизованою системою керування технологічним процесом компресорної станції – АСК ТП КС.

Технічні та програмні засоби САК ГПА, режимом функціонування якої беззупинний обмін по мережі з АСК ТП КС через робочу станцію оператора (PCO) за допомогою мережі Ethernet.

САК ГПА забезпечує таку швидкодію для вимірювальних, обчислювальних, керувальних та інформаційних каналів:

- час від початку зміни поточного значення параметра до видачі вихідного сигналу на виконавчий механізм для функції логічного керування та захисту ГПА – не більше ніж 0,3 с;

- час від початку зміни поточного значення параметра до його видачі на засіб відображення або його запису в архів не більше 0,1 с для функцій архівації і 1,0с для функцій представлення візуалізації інформації.

САК ГПА поряд з типовими завданнями виконує наступні функції керування:

- автоматичний пуск ГПА з виводом його не заданий режим та підтримку режиму роботи відповідно до завдання, яке видане оператором ГПА;

- автоматичне керування виконавчими механізмами та кранами газової обв'язки ГПА відповідно до алгоритмів керування;

- автоматичний захист за технологічними параметрами, зокрема антипомпажний захист;

- антипомпажне регулювання.

Режим керування задається з РСО САК ГПА.

Окрім цього, САК ГПА додатково виконує такі функції контролю:

- контролювання відхилень технологічних параметрів при досягненні параметрами граничних значень, зокрема параметрів, що характеризують явище помпажу;
- постійне контролювання технологічних параметрів, що характеризують явище помпажу з одночасним зазначенням граничних значень (попереджувальних та аварійних);
- формування масивів поточної та ретроспективної інформації у вигляді постійно оновлювальних масивів даних технологічних параметрів, режимів роботи, відхилення від заданих уставок та дій оператора;
- у САК ГПА передбачене постійне контролювання фазових портретів технологічних параметрів, що характеризують явище помпажу, і їхні граничні цикли.

Інформаційне забезпечення ГПА ГПА має бути достатнім для виконання усіх автоматизованих функцій системи. Інформаційною основою системи є поточні значення технологічних параметрів та показники технічного стану технологічного устаткування, значення керувальних сигналів.

Програмне забезпечення САК ГПА є достатнім для реалізації усіх функцій системи та містить у собі базове програмне забезпечення (БПЗ) і прикладне програмне забезпечення (ППЗ).

До складу БПЗ входить:

- пакет програм збору й обробки інформації, що забезпечує попередню обробку інформації – лінеаризацію, згладжування, фільтрацію та ін., а також видає сигнали керування;
- диспетчер реального часу, призначений для організації введення – виведення каналів зв'язку з об'єктом, запуску прикладних програмних модулів, організації роботи з САК ТП КС.

ППЗ має програми, необхідні для реалізації технологічних алгоритмів САК ГПА, та забезпечує:

- можливість виконання всього комплексу інформаційних, керувальних функцій контролю, зокрема за явищем помпажу;

- можливість заміни та додавання програмних модулів для модифікації: САК ГПА та нормування її функцій.

ПГЗ має дозволяти обслуговувальному персоналу робити зміни величини граничних значень межі помпажу і попереджувальної сигналізації з РСО.

Перед переведенням системи антипомпажного захисту в автоматичний режим запропоновано проведення помпажних тестувань [121].

Метою тестування є побудова реальної межі помпажу компресора і ввід уставок, що відповідають цієї межі, в контролер САК ГПА. Тестування здійснюється на робочому газі під час роботи компресора на байпасі при закритій відсікальній арматурі і лінії нагнітача, тобто до виходу компресора в мережу.

Для введення в експлуатацію системи антипомпажного захисту компресора необхідно виконати такі організаційні і технічні заходи:

- узгодити організаційні питання стосовно проведення помпажного тестування компресора;

- підключити основний контролер;

- підключити сигналізатор помпажу, підключити спецобладнання для запису помпажних характеристик до САК ГПА;

- шляхом плавного контрольованого прикриття байпасного клапану ввести компресор у помпаж на трьох різних частотах обертання турбіни. Тривалість перебування компресора в режимі помпажу має бути не більш ніж 2-3 помпажних цикли. Реальна тривалість випробувань – 1,5-2 год;

- привести попереднє оброблення результатів тестування;

- ввести результати випробувань в контролер САК ГПА і провести точне налаштування динаміки антипомпажного регулятора в основному і резервному режимах роботи. Тривалість налаштування 1 год.

Після виконання зазначених заходів система антипомпажного захисту готова до переведенням в автоматичний режим і можна виводити в мережу, тобто відкривати відсікальну арматуру на нагнітачі.

Висновки до розділу 4

1. Розроблено структуру автоматичного пристрою виявлення явища помпажу в системі “ВН ГПА - трубопровід”, яка основана на ефекті злиття даних реалізованого на засадах DF-технології, що дало змогу підвищити ймовірність безаварійної роботи ГПА.

2. Розроблено гібридну нейро-нечітку мережу для злиття даних і виявлення явища помпажу на основі адаптивної нейро-нечіткої системи виводу – Adaptive-Network-Based Fuzzy Inference System, що дало змогу обробляти інформацію про явище помпажу в режимі on-line і підвищити надійність захисту ВН ГПА від помпажу за допомогою системи автоматичного захисту.

3. Вперше розроблено інформаційну технологію раннього виявлення відхилення процесу компримування газу від нормальних робочих характеристик, що ґрунтується на багатовимірному аналізі і формуванні фазових портретів показників помпажу та їхньому порівнянні з атракторами. Коли процес наближається до зони помпажу, попередження шляхом сигналізації, або просто графічної зміни кольору передається на робочу станцію оператора для попередження про відхилення вимірювань від бажаного значення.

4. Удосконалено функціональну структуру системи автоматичного захисту, що реалізує спосіб захисту ГПА від помпажу на засадах інформаційної технології Data Fusion, який запропоновано реалізовувати на основі сигналізатора помпажу CompactLogix і програмного пакета RLD700ENE Professional.

Тематиці розділу IV присвячені роботи автора [75], [115], [120].

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

У дисертації наведено теоретичне узагальнення і нове вирішення важливого науково-прикладного завдання в галузі автоматизації процесів керування, що відповідають меті дослідження, а саме вдосконалення динамічного методу автоматичного антипомпажного захисту системи “ВН ГПА – ТП” для підвищення надійності компримування природного газу.

Проведені дослідження дозволили дійти таких висновків:

1. Виконано науковий аналіз стану проблеми автоматичного антипомпажного захисту відцентрових нагнітачів газоперекачувальних агрегатів дотискувальних компресорних станції підземних сховищ газу. Розглянуто особливості застосування методів антипомпажного захисту, що існують, а також структуру і вимоги до системи автоматичного антипомпажного захисту, що дозволило відзначити основні переваги і недоліки існуючих методів. Показано, що ефективність існуючих систем антипомпажного захисту не в повній мірі відповідає вимогам технологічного процесу, виявлено тенденції їхнього розвитку і удосконалення. Внаслідок аналізу виявлено, що в граничних режимах зі зміною продуктивності нагнітача в системі виникають автоколивання низької частоти, викликані явищем обертового зриву в проточній частині компресора. Це явище є характерною ознакою передпомпажного стану і має властивості, які дозволяють виявляти його на фоні інших процесів. Зроблено висновок стосовно доцільності розроблення методів автоматичного антипомпажного захисту відцентрових нагнітачів газоперекачувальних агрегатів, які адаптовані до умов експлуатації на дотискувальних компресорних станції підземних сховищ газу.

2. Встановлено функціональний вид і параметри розподілу сумарного спостережуваного випадкового процесу в контурі зворотного зв'язку системи, отриманого шляхом злиття (додавання) даних на основі аналізування наявних даних експериментального дослідження нестационарних процесів з вимірюванням параметрів, що характеризують початок помпажу в системі “відцентровий нагнітач газоперекачувального агрегату - трубопровід”. Це дає

зможу виробити рекомендації щодо вибору структури системи автоматичного антипомпажного захисту, інваріантної щодо функціонального розподілу випадкового процесу, що діє в контурі зворотного зв'язку.

3. Розроблено інформаційну технологію раннього виявлення відхилення процесу компримування газу від нормальних робочих характеристик, що ґрунтується на багатовимірному аналізі і формуванні фазових портретів показників помпажу та їхньому порівнянні з атракторами, що дозволило відображати та попереджувати про відхилення вимірювань від бажаного значення.

4. Запропоновано модель визначення зон втрати стійкості розв'язків системи диференціальних рівнянь, що дозволило встановити, що, явище помпажу корелює з втратою стійкості розв'язків системи, яка описує взаємозв'язок між контрольованими параметрами (тиск та витрата). Встановлено тип кожної з точок положення рівноваги, що дозволило встановити як відповідні значення характеризують явище помпажу або виникнення передпомпажних ефектів.

5. Розроблено функціональну структуру схеми автоматичного антипомпажного захисту відцентрового нагнітача в складі САК ГПА ДКС ПСГ, що дозволяє розпізнавати стани об'єкта керування з мінімальною ймовірністю помилки розпізнавання станів керування, окрім цього система сприяє збільшенню технічного ресурсу ВН ГПА, забезпечує стабільність і безперебійність перекачування газу.

6. Розроблений метод автоматичного антипомпажного захисту підсистеми "відцентровий нагнітач газоперекачувального агрегату - трубопровід" опробований на результатах експериментальних досліджень, що проведені на ДКС ПСГ "Більче-Волиця".

Отримані результати прийняті до використання та впровадження на філії УМГ «Прикарпаттрансгаз» ПАТ «Укртрансгаз», а саме методика раннього виявлення відхилення процесу компримування газу від нормальних робочих характеристик, яка побудована на основі гібридної нечіткої нейронної мережі,

що дає змогу зменшити кількість позапланових ремонтів обладнання, викликаних виникненням помпажних явищ у нагнітачах (акт про впровадження від 19.11.2015р.) та ТзОВ «МІКРОЛ» - модель інтелектуальної системи виявлення відхилень технологічних процесів від нормальних робочих характеристик за умов невизначеності, що побудована на засадах інформаційної технології з використанням гібридної нейро-фаззі архітектури, що дозволить розв'язувати задачі прогнозування та ідентифікації у реальному часі (акт про впровадження від 17.11.2015р.).

Результати використано при виконанні держбюджетної теми № ДР 0111U005890. Наукові положення, висновки і рекомендації, що викладені у дисертації, використовуються у навчальному процесі ІФНТУНГ на кафедрі автоматизації та комп'ютерно-інтегрованих технологій для викладання дисципліни “Автоматизація технологічних процесів нафтової і газової промисловості” для студентів спеціальності 151 – автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології, що підтверджено відповідним актом впровадження від 09.11.2015 р. Результати теоретично-експериментальних досліджень є внеском у подальший розвиток та удосконалення методів автоматичного антипомпажного захисту компресорних установок і можуть бути рекомендовані для використання підприємствами (НАК “Нафтогаз України”, Укргазтех, ДК “Укртрансгаз”), а також для виконання студентами дипломних і магістерських робіт.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ЛІТЕРАТУРНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Про схвалення Енергетичної стратегії України на період до 2030 року: Постанова Кабінету Міністрів України від 15 березня 2006 р. № 145. URL: <http://zakon1.rada.gov.ua>.
2. Чернега О. Б., Белозубенко В. С., Расторгуев А. С. Основные структурные особенности реализации транспортно-транзитного потенциала Украины. *Вісник Хмельницького національного університету*. Хмельницький, 2008. № 3. С. 101–106.
3. Бляут Ю. Є. Автоматична ідентифікація помпажних характеристик газоперекачувальних агрегатів з газотурбінним приводом для ефективного регулювання : автореф. дис. ... канд. тех. наук : 05.13.07. Івано–Франківськ, 2013. 20 с.
4. Мамонов О. І., Таргонський В. О., Ніщета В. В. Впровадження енергозберігаючих технологій при протипомпажному керуванні нагнітачами *Інформаційний огляд ДК «Укртрансгаз»*. Київ, 2006. № 1 (37). С. 6–8.
5. Акустичний спосіб контролю передпомажного стану відцентрового нагнітача: пат. 91465 Україна: МПК F04D 27/02. № а200907520; заявл. 17.07.2009; опубл. 26.07.2010, Бюл. № 14. 4 с.
6. Прошовиков С., Макаров А., Бунин В., Черников А. Опыт автоматизации сложных промышленных объектов на примере газокomppressorных станций. *Системная интеграция. Нефтегазовая промышленность*, 1999. № 2. С.16–25.
7. Гіренко С. Г. Автоматичне антипомпажне регулювання відцентрового нагнітача дотискувальної компресорної станції : автореф. дис. ... канд. тех. наук: 05.13.07. Івано-Франківськ, 2010. 20 с.
8. Казакевич В. В. Автоколебания (помпаж) в компресорах. М. : Машиностроение, 1974. 264 с.
9. Герасименко В. П. Анализ процессов и разработка методов повышения эффективности компрессоров на нерасчетных режимах работы : дис. ... д-ра техн. наук: 05.04.12. Х., 1993. 352 с.

10. Зельмат Мимун. Методы исследования и управления режимами работы трубопроводного транспорта газа : дис. ... док. техн. наук : 05. 13.07. М., 1992. 332 с.
11. Автоматизация и защита от помпажа. URL : <http://www.niitk-kazan.ru/direction/avtomatiza/>.
12. Система антипомпажное регулирование и защита компрессорного оборудования. URL : <http://smartservice.kharkov.ua/en/automation.php>.
13. Система противопомпажной защиты (ППЗ) центробежных компрессорных машин ЗАО Невинтерман. 2003. С.8.
14. Ніщета В. В., Свістельник О. В., Мамонов О. І., Таргонський В. О. Помпажні явища та їх вплив на моторесурс ГПА. *Інформаційний огляд ДК «Укртрансгаз»*. Київ, 2006. №3. С. 6–9.
15. Ніщета В. В., Скулкін М. М., Суханов Є. О., Пономаренко С. А. Десятирічний досвід експлуатації протипомпажного захисту типу УЗП–03 на КС «Ромни» Сумського ЛВУ МГ. *Інформаційний огляд ДК «Укртрансгаз»*. Київ, 2006. № 2. С. 8–11.
16. Ніщета В. В., Свістельник О. В., Пателюх П. І., Чижман Г. М. Дослідження роботи нагнітача RF–2BB–30 газоперекачувального агрегату у передпомпажній зоні. *Інформаційний огляд ДК «Укртрансгаз»*. Київ, 2006. № 4 (40). С. 15–17.
17. Слободян А. В. Система передпомпажного попередження та визначення робочої точки газоперекачувального агрегату типу ГТК–10 на базі мікропроцесорного контролера МПК–51. *Нафтогазова енергетика*. Івано-Франківськ, 2007. № 3. С. 31–34.
18. Способ диагностики помпажа компрессора газотурбинного двигателя: пат. 2187711 Российская Федерация: МПК F 04 D 27/02. № 2000129301/06; заявл. 22.11.2000; опубл. 20.08.2002. 4с.
19. Способ формирования сигнала помпажа турбокомпрессора: пат. 2263234 Российская Федерация: МПК F04D27/02. № 2004/36854/06; заявл. 2004–12–16; опубл. 27.10.2005, Бюл. №10.

20. Способ защиты компрессора от помпажа: пат. 504884 СССР: МКИ F 04 D 27/02. № 1915552/24–6; заявл. 16.05.73; опубл. 28.02.76, Бюл. № 8.
21. Шайхутдинов А. З., Балавин М. А., Продовиков С. П. Автоматизация процессов газовой промышленности. Санкт–Петербург : Наука, 2003. С. 496.
22. Способ защиты турбокомпрессора от помпажа: пат. А. с. 700687 СССР: МКИ F04 D 27/02. № 2564768/25–06; заявл. 04.01.78; опубл. 30.11.79, Бюл. № 44.
23. Способ защиты компрессора от помпажа: пат. А.с. 985450, СССР: F 04 D 27/02 3. № 3324693/25–06; заявл. 22.07.81; опубл. 30.12.82, Бюл. № 48.
24. Способ обнаружения помпажа и оценки параметров помпажных колебаний в компрессорах газотурбинных установок: пат. 2273831 Российская Федерация: МПК G01H 17/00. № 2004126807/28; заявл. 06.09.2004; опубл. 10.04.2006, Бюл. № 10.
25. Письменный И. Л. Многочастотные нелинейные колебания в газотурбинном двигателе. М. : Машиностроение, 1987. 128 с.
26. Спосіб захисту компресора від помпажу: пат. 89302 Україна : № a200807810; заявл. 09.06.2008; опубл. 11.01.2010, Бюл. № 1. 6 с.
27. ISO 13381–1:2004 Condition monitoring and diagnostics of machines – – Prognostics – Part 1: General guidelines. Internation Organization for Standart URL: http://www.iso.org/iso/catalogue_detail.htm?csnumber=21841.
28. Sandy Dunn. Condition Monitoring in the 21st Century. *Plant Maintenance Resource Center*. 2002. URL: <http://www.plant-maintenance.com/articles/ConMon21stCentury.shtml>.
29. Reichard K. M. Expanding the Foundation for Prognostic Health Management in Complex Mechanical Systems. 2004. URL: http://www.arofe.army.mil/Conferences/CBM_Abstract/papers/Reichard_UPenn.pdf
30. Thakker A. PEDS–Intelligent Prognostic for Diagnostic Systems. 2003, Global Technology Connection, Inc.

31. SAE International. Guide to Temperature Monitoring in Aircraft Gas Turbine Engine. URL:<http://standards.sae.org/wip/air1900b/>.
32. Witt C. AIR 1839 – A Guide to Aircraft Turbine Engine Vibration Monitoring Systems. SAE Technical Paper 841458. 1984, doi:10.4271/841458. URL: <http://papers.sae.org/841458/>.
33. SAE AIR 1872 Guide to Life Usage Monitoring and Parts Management for Aircraft Gas Turbine Engines. 2011. URL:<http://standards.sae.org/air1872b/>.
34. SAE International AIR1873 Guide to Limited Engine Monitoring Systems for Aircraft Gas Turbine Engines. 2012. URL: <http://standards.sae.org/air1873/>.
35. SAE International AIR1900A Guide to Temperature Monitoring in Aircraft Gas Turbine Engines. 2014. URL: <http://standards.sae.org/air1900a/>.
36. SAE International AIR4175A Guide to the Development of a Ground Station for Engine Condition Monitoring. 2012. URL: <http://standards.sae.org/air4175a/>.
37. SAE International AIR4061B Guidelines for Integrating Typical Engine Health Management Functions Within Aircraft Systems. 2012. URL: <http://standards.sae.org/air4061b/>.
38. SAE International AS 8054 Airborne Engine Vibration Monitoring (EVM) System, Guidelines for Performance Standard. URL: <http://standards.sae.org/wip/as8054a/>.
39. Hitchcock L. Evolving international standards for machine condition monitoring. *New Engineer Journal*, 2005. № 9(1). P. 25–27.
40. Hitchcock L. Compliance with ISO Standards for Condition Monitoring. *Proceeding of International Conference on Condition Monitoring*, Cambridge, 2005. P. 157–166.
41. Holroyd T. J. The application of AE in condition. *Proceeding of International Conference on Condition Monitoring*, Cambridge, 2005. P. 1–6
42. Thomson W. T., Gilmore R. J. Motor Current signature analysis to detect induction faults in Induction motor Drives. *Fundamentals, Data Interpretation and*

Industrial case Histories—proceedings of Thirty second turbo machinery symposium. 2003. P. 145–156.

43. Schienle M., Zanon T., Schmittlandsiedel D. Improved SRAM failure diagnosis for process monitoring via current signature analysis. *Microelectronics Reliability*. Vol. 39. 1999. P. 1009–1014.

44. Kar C., Mohanty A. R. Monitoring Gear Vibrations through Motor Current Signature Analysis and Wavelet Transform. *Mechanical Systems and Signal Processing*. 2006. № 20. P. 158–187.

45. Roemer M. J., Kacprzyński G. J. Advanced Diagnostics and Prognostics for Gas Turbine Engine Risk Assessment. *ASME and IGTI Turbo Expo*. Munich, 2000. P. 345–353.

46. Hountalas D. T., Kouremenos A. D. Development and application of a fully automatic troubleshooting method for large marine diesel engines. *Applied Thermal Engineering*. Vol. 19, Issue 3. 1999. P. 299–324.

47. Hountalas D. T. Prediction of marine diesel engine performance under fault conditions. *Applied Thermal Engineering*. Vol. 20, Issue 18. 2000. P. 1753–1783.

48. Walter T. J., H. Lee. Development of a Smart Wireless Sensor for Predicting Bearing Remaining Useful Life. *Proceedings of the 58th Meeting of the Society for Machinery Failure Prevention Technology*. Virginia, 2004. P.77–87.

49. Lebold M., Boylan D., McClintic K., Dobbins D., McKem J. Development of a Smart Wireless Sensor for Predicting Bearing Remaining Useful Life. *Applications Proceedings of the 58th Meeting of the Society for Machinery Failure Prevention Technology*. Virginia, 2004. P.63–77.

50. Toutountzakis T., Tan C. K., Mba D. Application of Acoustic Emission to seeded gear fault detection. *NDT and International*. 2005. V.38, Issue 1. P.27–36.

51. Fan Y. E., Gu F., Ball A. A comparative study of a vibration and acoustics emission techniques to detect early stage damage of rolling element

bearing. *Proceeding of International Conference on Condition Monitoring*. Cambridge, UK. 2005. P. 373–378.

52. Carney E. Monetary, logistical and technical benefits of a prognostic health management system. *Proceedings of the 58th Meeting of the Society for Machinery Failure Prevention Technology*. Virginia, 2004. P. 63–77.

53. Gorodetski V., Karsayev O., Samoilov V. Multi-agent data fusion systems: design and implementation issues. *Proceedings of the 10th International Conference of Telecommunication Systems. Modeling and Analysis*. Monterey, CA, 2004. P. 762–774.

54. Schaefer C. G., Hintz K. J. Sensor management in a sensor rich environment. *Proceedings of the SPIE International Symposium on Aerospace. Defense Sensing and Control*. Orlando, FL, 2000. vol. 4052. P. 48–57.

55. Yan W., C. James Li, Kai F. Goebel. Flight remige mapping for aircraft engine fault diagnosis. *Proceedings of the 58th Meeting of the Society for Machinery Failure Prevention Technology*. Virginia, 2004. P. 13.

56. Liu Y. Gas turbine fault diagnosis using data fusion techniques. *Harbin politechnical university*. Harbin, 2000.

57. Lebold M., Boylan D., McClintic K., Dobbins D., McKem J. Development of Distributed Wireless Smart Sensors for Gearbox Prognostic. *Applications Proceedings of the 58th Meeting of the Society for Machinery Failure Prevention Technology*. Virginia, 2004. P. 63–77.

58. Технологічні вимоги до систем антипомпажного регулювання відцентрових нагнітачів газоперекачувальних агрегатів. Затв. наказом ДК “Укртрансгаз” 30.12.99. № 399. 9 с.

59. Тельнов К.А., Файнштейн А. А., Шабашов С. З. Автоматизация газоперекачивающих агрегатов с газотурбинным приводом. Учебное пособие. Ленинград : Недра, 1983. 280 с.

60. Давиденко Л. І., Семенцов Г. Н. Методи злиття даних для виявлення явища помпажу у відцентрових нагнітачах газоперекачувальних

агрегатів. *Науковий вісник Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу*. Івано-Франківськ, 2013. № 2(35). С.174-181.

61. Семенцов Г.Н. Синтез однотактної системи автоматичного захисту компресора від помпажу. *Науковий журнал «Технологічні комплекси»*. Луцьк, 2010. № 2. С. 137–151.

62. Varshney P. K. Distributed detection and data fusion. New York, NY: Springer-Verlag New York Inc., 1996. 288 p.

63. Byington C. S., K. Garga. Data fusion for development predictive diagnostic for electromechanical systems. Handbook of Sensor Fusion. CRC Press, 2000. P. 23 – 31.

64. Xiaofeng Liu. Machinery Fault Diagnostics Based on Fuzzy Measure and Fuzzy Integral Data Fusion Techniques. School of Engineering Systems. 2005. 220 p.

65. Gao J., Harris C. J. Some Remarks on Kalman Filters for the Multisensor Fusion. *Information Fusion Journal*. 2002. V.3. P. 191–201.

66. He Y., Guo D., Chu F. Using genetic algorithms to detect and configure shaft crack for rotor-bearing system. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*. 2001. V.190. P. 5895-5905.

67. Семенцов Г. Н., Давиденко Л. І. Розвиток інформаційного забезпечення системи автоматичного антипомпажного захисту та регулювання газоперекачувального агрегату. *Східно-Європейський журнал передових технологій*. 2014. Т. 4, № 11(70). С. 20 – 24.

68. Grabisch M. The application of fuzzy integrals in multi criteria decision making. *European Journal of Operational Research*. 1996. V. 89. P. 445 – 456.

69. Давиденко Л. І., Семенцов Г. Н. Виявлення явища помпажу відцентрових нагнітачів газоперекачувальних агрегатів на основі методу злиття даних. *Нафтогазова енергетика 2013: матеріали міжнар. наук.-техн. конф.* Івано-Франківськ, 2013. С. 460 – 463.

70. Давиденко Л. І. Ідентифікація нечіткої міри за обмежень, які накладаються експертом на параметри інтеграла Шоке. *Автоматизація та*

комп'ютерно-інтегровані технології: матеріали I міжнар. наук.-практ. конф. молодих учених, аспірантів і студентів. Київ, 2014. С. 23-24.

71. Петрова И. Ю., Глебов А. А. Прогнозирование электропотребления с помощью нейро-нечеткой системы ANFIS. Алгоритм отбора данных входных переменных. *Инженерное образование. Наука в образовании: электронное научное издание*. URL : <http://technomag.bmstu.ru/doc/59674.html>.

72. Jang J-S. R. ANFIS: Adaptive-Network-Based Fuzzy Inference. *System IEEE Trans. Systems, Man, Cybernetics*. 1993. 23(5/6) . P.665-685.

73. Стеценко Д. О., Зігунов О. М., Смітюх Я. В. Інтелектуальна обробка даних в системі автоматизованого управління технологічним комплексом браго ректифікації. *Технологический аудит и резервы производства*. 2014. Т. 2. № 1 (16). С. 49–52.

74. T. Takagi, M. Sugeno. Derivation of fuzzy control rules from human operator's control actions. *Proceedings of the Symposium on Fuzzy Information. Knowledge Representation and Decision Analysis*. France, 1983.

75. Feshanych L. I., Sementsov G. N. Intelligent analysis of multiparameter data based on the adaptive neuro-fuzzy system. *IEEE First International Conference on Data Steam Mining and Processing*. Lviv, 2016. P. 117-119.

76. Фешанич Л. І., Семенцов Г. Н. Розроблення описової фізичної моделі взаємодії трьох підсистем у системі автоматичного керування газопереключаювальним агрегатом. *Мир науки и инноваций*. Выпуск 1(42). Том 3. Иваново : Научный мир, 2016 – С. 43-50.

77. Чинаев П. И. Методы анализа и синтеза многомерных автоматических систем. Киев: Техника, 1969. 380 с.

78. Фешанич Л. І., Семенцов Г. Н. Проблема відмови давачів і їх колективного спрацювання при експлуатації системи автоматичної системи антипомпажного керування. *Науково-технічний журнал: Методи та прилади контролю якості*. Івано-Франківськ, 2016. № 2 (37). С. 14-19.

79. Измайлов Р. А., Селезнев К. П. Нестационарные процессы в центробежных компрессорах. *Химическое и нефтяное машиностроение*. 1995. № 11. С. 20–24.
80. Sementsov G. N., Blyaut J. E., Davydenko L. I. Metodo di identificazione delle caratteristiche di consumo pressione di unità di compressione gas centrifughe. *Italian Academic and Scientific Journal*. 2014. Issue 5(14). P. 372-376.
81. Семенцов Г.Н., Фешанич Л. І. Інформаційна технологія підвищення швидкодії автоматичного захисту компресора від помпажу на основі злиття даних. *Вісник національного технічного університету "Харківський політехнічний інститут". Механіко-технологічні системи та комплекси*. Харків, 2015. № 5. С. 68 – 82.
82. Фешанич Л. І., Семенцов Г. Н. Модель Multiple Input-Multiple Output газоперекачувального агрегату. *Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології: матеріали Третьої міжн. наук.-практ. конф. молодих учених, аспірантів і студентів (м.Київ, 20–21 квітня 2016 р.)*. К.: НТУУ «КПІ», 2016. С. 104-106.
83. Лукас В. А. Оптимальное управление многомерными технологическими объектами. Свердловск : СГИ, 1984. 78 с.
84. Полонський О. Д. Синтез класифікаторів станів об'єктів керування за умов невизначеності: автореф. дис. ...док. тех. наук: 05.13.07. Х., 2007. 35 с.
85. Лукас В. А. Теория автоматического управления: учебник для вузов. М : Недра, 1990. 416с.
86. Фешанич Л. І. Синтез спостерігача класів станів відцентрового нагнітача газоперекачувального агрегату за умов невизначеності. *Технологічні комплекси: Зб. наукових праць VI Міжн. наук.-техн. конф. Луцьк, 2016. с. 31-32.*
87. Семенцов Г. Н., Фешанич Л. І. Використання технології злиття даних на основі JDL – моделі для підвищення ефективності антипомпажного захисту газоперекачувальних агрегатів. *Автоматика–2015: матеріали XXII міжн. конф. з автоматичного управління*. Одеса, 2015. С. 166-167.

88. Фешанич Л. І. Використання DF-методів для вдосконалення інформаційного забезпечення системи автоматичного керування. *Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології* – 2015: матеріали зб. тез доп. II міжн. наук.-практ. конф. молодих учених, аспірантів і студентів. Київ: КІП, 2015. С.104-106.
89. Чубукова И. А. Data Mining: учебное пособие. М. : Интернет-университет информационных технологий. БИНОМ: Лаборатория знаний, 2006. 382 с. URL: (<http://www.intuit.ru/department/database/datamining/>).
90. Цыпкин Я. З. Синтез робастно оптимальных систем управления объектами в условиях ограниченной неопределенности. *Автомат. и телемех.* 1992. № 9. С. 139 – 159.
91. Пугачев В. С. Теория случайных функций: и ее применение к задачам автоматического управления/ Гос. изд-во физико-математической литературы. 1960. 883 с.
92. Полонский А. Д. Синтез адаптивных систем управления в условиях неопределенности возмущений. *Автоматизированные системы управления и приборы автоматики*. Харьков : ХНУРЭ, 2003. Вып. 123. С. 37 – 39.
93. Семенцов Г. Н., Л. І. Фешанич. Аналіз законів розподілу випадкових процесів, отриманих в результаті багатопараметричного злиття даних. *Науковий журнал «Технологічні комплекси»*. Луцьк, 2014. № 2(10). С. 43-49.
94. Давиденко Л. І. Експериментальна оцінка законів розподілу випадкових процесів у системі автоматичного керування газоперекачувальним агрегатом дотискувальної компресорної станції підземного сховища газу. *Всеукраїнський науково-технічний журнал: Нафтогазова енергетика*. Івано-Франківськ, 2014. № 1(21). С. 64-69.
95. Бляут Ю. Є. Система автоматичного керування агрегатом Ц-6.3 та метрологічне забезпечення її вимірювальних каналів. *Всеукраїнський науково-технічний журнал: Нафтогазова енергетика*. Івано-Франківськ, 2010. № 1(12). С. 46 – 49.

96. Семенцов Г. Н., Фешанич Л. І., Петеш М. О. Статистична оцінка акустичних сигналів, які характеризують передпомпажний стан відцентрового нагнітача. *Сборник научных трудов SWorld*. Выпуск 4(37). Том 3. Иваново: Маркова Ад, 2014. С. 51-56.
97. Семенцов Г. Н., Фешанич Л. І. Використання DF-методів для моніторингу технічного стану газоперекачувальних агрегатів. *Обчислювальний інтелект: матеріали III міжн. наук.-практ. конф.* Черкаси, 2015. С. 254-256.
98. Durrant-Whyte H. F. Sensor models and multisensor integration. *International Journal of Robotics Research*. 1988. V. 7. P. 97–113.
99. Фешанич Л. І., Семенцов Г. Н. Проблема відмови давачів і їх колективного спрацювання при експлуатації системи автоматичної системи антипомпажного керування. *Науково-технічний журнал: Методи та прилади контролю якості*. Івано-Франківськ, 2016. № 2 (37). С. 14-19.
100. Абрамов Ю. А., Гвоздь В. М., Тищенко Е. А. Повышение эффективности обнаружения пожара по температуре. Харьков : НУГЗУ, 2011. 129 с.
101. Поспелов Б. Б., Басманов А. Е. Структурный метод повышения надежности датчиков первичной информации в системе ослабления последствий чрезвычайной ситуации. *Збірка наукових праць*. Випуск 14. 2011. с.129–134.
102. Седов Л. И. Механика сплошной среды. М. : Наука, 1970. 568 с.
103. Бутиков Е. И., Кондратьев А. С. Физика. Книга 1. Механика. М.: Наука, 1994. 367 с.
104. Зайцев Л. А. Регулирование режимов магистральных нефтепроводов. М.: Недра, 1982. 240 с.
105. Фешанич Л. І. Удосконалення структури системи автоматичного антипомпажного захисту відцентрового нагнітача газоперекачувального агрегату. *Автоматика–2017: матеріали XXIV міжн. конф. з автоматичного управління*. Київ, 2017. С. 74-75.

106. Флетчер К. Численные методы на основе метода Галёркина. М.: Мир, 1988. 352 с.
107. Самарский А. А., Гулин А. В. Численные методы. М : Наука, 1989. 432 с.
108. Тихонов А. Н., Арсенин В. Я. Методы решения некорректных задач. М. : Наука, 1979. 285 с.
109. Самойленко А. М., Кривошея С. А., Перестюк Н. А. Дифференциальные уравнения (примеры и задачи). К. : Выща шк., 1984. 408 с.
110. Фешанич Л. І., А. П. Олійник. Метод виявлення явища помпажу у відцентрових нагнітачах газоперекачувальних агрегатів. *Вісник Нац. техн. ун-ту "ХПІ"* : зб. наук. пр. Сер.: *Механіко-технологічні системи та комплекси*. Харків : НТУ "ХПІ", 2017. № 19 (1241). С. 114-119.
111. Перевалов А. ОС реального времени в MILS-архитектуре. *Мир автоматизации*. 2007. С. 6-10.
112. Крутніков Т. Е. Система диагностирования передпомпажного состояния центробежного компрессора: автореф. дис. ... канд.техн.наук: 05.04.06. С. -П.,2013. 18с.
113. Семенцов Г. Н., Петеш М. О. Система контролю звукових характеристик газоперекачувального агрегату дотискувальної компресорної станції підземного сховища газу для виявлення явища помпажу. *Вісник Хмельницького національного університету*. 2009. №1. С. 122-125.
114. Пахомова В. М. Розробка підсистеми оперативного прогнозування простоїв прибуваючих поїздів на основі ANFIS-системи. URL : <http://eadnurt.diit.edu.ua/jspui/handle/123456789/3158>
115. Sementsov H.N., Feshanych L.I. Informative technology of early diagnosis of deviated gas compression process from normal gas process. *Науковий вісник Національного гірничого університету*. 2016. № 5. С. 137-143.
116. Семенцов Г. Н., Фешанич Л. І. Метод раннього виявлення відхилення процесу компримування газу від нормальних характеристик. *Мир науки и инноваций*. Выпуск 2(2). Том 2. Иваново: Научный мир, 2015.С. 21-39.

117. Фельдбаум А. А., Дудыкин А. Д., Мановцев А. П., Миролубов Н. Н. Теоретические основы связи и управления. М. : Физматгиз, 1963. 932 с.
118. Долгова Е. В., Файзрахманов Р. А. Распознавание ситуаций при управлении материальными потоками предприятия. *Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика*. 2005. № 5. С. 60 – 62.
119. Система автоматического управления КМТ-71 ГПА Ц-6,3. Техническое описание. Укргазгеоавтотамика. Харьков, 2005. 15с.
120. Фешанич Л. І., Семенцов Г. Н. Удосконалення структури системи автоматичного антипомпажного захисту відцентрового нагнітача газоперекачувального агрегату. *Автоматика–2016: матеріали XXIII міжн. конф. з автоматичного управління*. Суми, 2016. С. 74-75.
121. Allen-Bradley Rockwell Automation ControlLogix5555™, CompactLogix™ для управления центробежным компрессором. Казань-Москва, 2006. 15с. URL: <http://www.indautomation.ru/downloads/pa/Kompressor.pdf>.

ДОДАТКИ

ДОДАТОК А

Сутність способів виявлення помпажу та їх недоліки

№	Спосіб виявлення помпажу	Недоліки	Кількість контролюваних параметрів
1	2	3	4
1	Вимірюють тривалість оберту ротора, обчислюють приріст тривалості від оберту до оберту і аналізують поведінку приросту [25]	Помпаж може виникати за різних вихідних швидкостей обертання ротора компресора. Захист відбувається тільки після виникнення помпажу.	1
2	Виявляється несанкціоноване зменшення частоти обертання ротора як непрямої ознаки помпажу [26]	Не може бути використано як самостійний параметр, що характеризує явище помпажу, внаслідок певної інерційності ротора	1
3	Помпаж виявляється за швидкістю падіння тиску за компресором [25]	Швидкість падіння тиску суттєво залежить від режиму роботи і може змінюватися більше ніж на порядок, що значно ускладнює прийняття рішення про виникнення явища помпажу	1

Продовження додатку А

1	2	3	4
4	<p>Вимірюють комплекс параметрів, що характеризують режим роботи компресора, визначають на ньому координати робочої точки компресора, визначають їхню віддаленість від заданої величини і пропорційно їй змінюють стан органа управління для забезпечення перебування компресора в сталому режимі роботи [28, 29]</p>	<p>Мала надійність захисту компресора від помпажу внаслідок необхідності використання сталої заданої величини, що характеризує межу від сталого до помпажного режиму роботи</p>	2
5	<p>За комплексом вимірюваних параметрів, що характеризують робочий режим компресора (тиски та температури газу на вході та виході компресора, частота обертів ротора, густина газу, швидкість звуку, об'ємна та масова витрата газу на вході або виході компресора) визначають координати робочої точки компресора в системі координат “політропний напір – об'ємна витрата”, або “ступінь стиснення газу – масова витрата” [27]</p>	<p>Інерційність органів управління – швидкодія керованих байпасних клапанів становить 0,2 с, а стала часу контуру регулювання швидкістю обертання ГПА $\leq 1-2$ хвилини, можуть зменшити надійність захисту від раптового виникнення помпажу</p>	8

Продовження додатку А

1	2	3	4
	На основі інформації про зміни витрати і перепаду тиску на вході і виході в компресор [31]	Необхідність вимірювання витрати і перепаду тиску на виході і вході в компресор і відсутність регулювань точності	4
7	На основі інформації про тиск на вході і виході компресора, частоти обертання ротора і витрати газу [32]	Низька надійність через велику кількість давачів і відсутність регулювання точності [30]	4
8	Пристрій містить давач тиску за компресором, регулятор обертів і привод паливного клапана, зв'язаний з паливним клапаном та відрізняється тим, що в нього введений блок регулювання точності давача тиску [35]	Необхідність визначення швидкості зміни тиску, блокування регулятора частоти обертання ротора і наявність блоку затримки	1
9	Шляхом відкриття антипомпажного клапана пропорційно відхиленню комплексу параметрів від заданої величини, за якого в момент початку помпажу фіксують поточну величину комплексу параметрів і приймають остаточно як задану величину [34]	Недостатньо надійний і якісний спосіб	4

Продовження додатку А

1	2	3	4
10	Шляхом вимірювання поточних значень параметрів, що характеризують положення робочої точки компресора, уточнення та запам'ятовування положення межі помпажу і формування вихідного сигналу антипомпажного регулятора пропорційно віддаленості робочої точки компресора від межі помпажу [33]	Недостатня швидкодія і надійність	4
11	Для отримання акустичних сигналів, контрольованого об'єкту (ГПА) на робочих поверхнях нагнітача – вхідному і вихідному конфузорах встановлюють акустичні сенсори з діапазоном сприйняття акустичних сигналів від 16 Гц до 20 кГц, що формують вихідний сигнал в аналогово-цифровій формі, пропорційній амплітуді акустичних коливань,	Акустичні сигнали щільно корелюють з сигналами від вібродавачів	2

Продовження додатку А

1	2	3	4
	<p>який через систему автоматичного керування надходить по оптоволоконному каналу передачі даних на робочому станцію оператора, де в автоматичному режимі здійснюється алгоритмічна обробка з тактом < 10 мілісекунд, отриманих від акустичних сенсорів сигналів, після чого шляхом аналізування і зіставлення отриманих сигналів відносно відомих наперед критеріїв оцінювання виникнення передпомпажних коливань система формує попереджуваний сигнал про початок помпажних явищ, який надходить до системи автоматичного керування для формування сигналу керувальної дії на виконавчі механізми, що забезпечують виведення ГПА в зону стійкої роботи</p>		

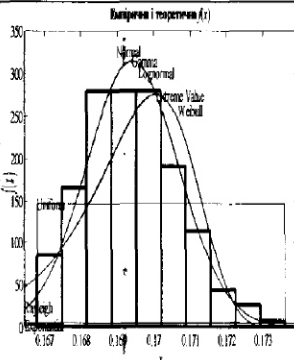
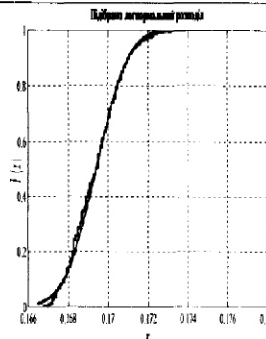
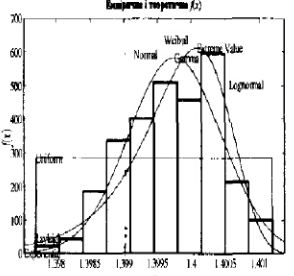
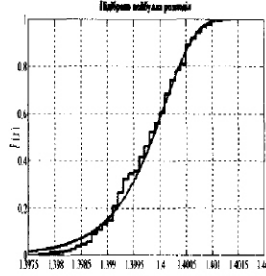
Продовження додатку А

1	2	3	4
12	На основі інформації про динаміку зміни контрольованого параметру – яркісної температури випромінювання поверхонь елементів конструкції газотурбінного двигуна та її похідної першого порядку за часом [35]	Недостатня швидкодія внаслідок недостатньої динаміки зміни температури	2
13	З використанням методів оптичної пірометрії з фіксуванням поточної яскравості температури та її похідної випромінювання нагрітої поверхні роторних лопаток турбіни двигуна, деталей, а також камери згоряння [35]	Недостатня швидкодія і достовірність внаслідок недостатньої динаміки зміни температури і можливого перевищення її над заданим значенням в ситуаціях, що не пов'язані з помпажем	2
14	Вимірюючи параметри, які характеризують робочий режим компресора, визначають за ними координати робочої точки компресора, їхня віддаленість від заданої величини і пропорційно їй змінюють стан органів управління компресором [36]	Необхідність регулярного введення робочої точки нагнітача в зону помпажу; необґрунтовані запаси з помпажу призводять до перевитрати паливного газу	7

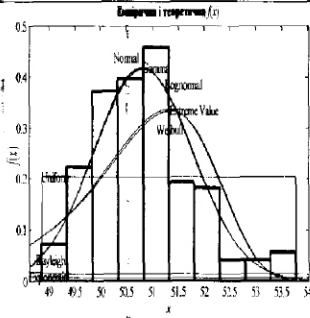
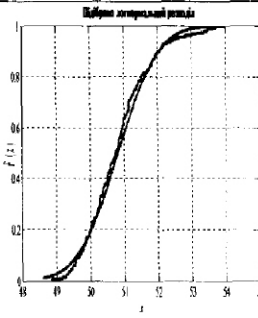
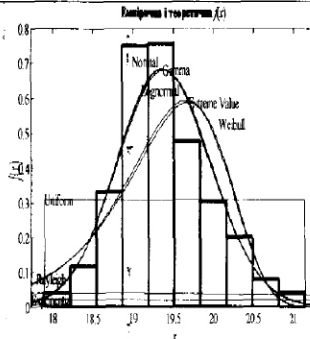
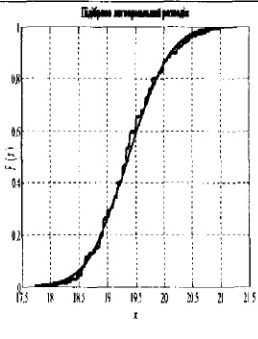
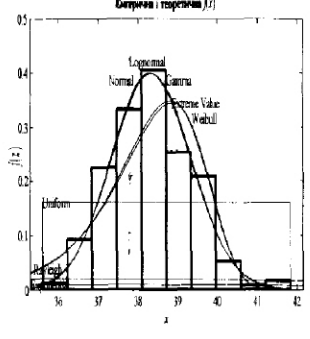
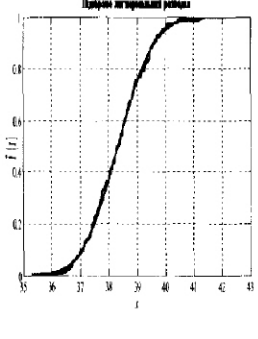
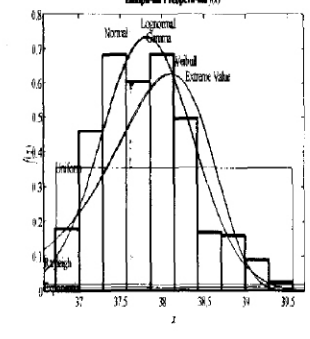
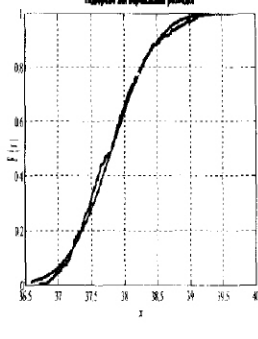
ДОДАТОК Б

Емпіричні та теоретичні щільності і функції розподілу параметрів

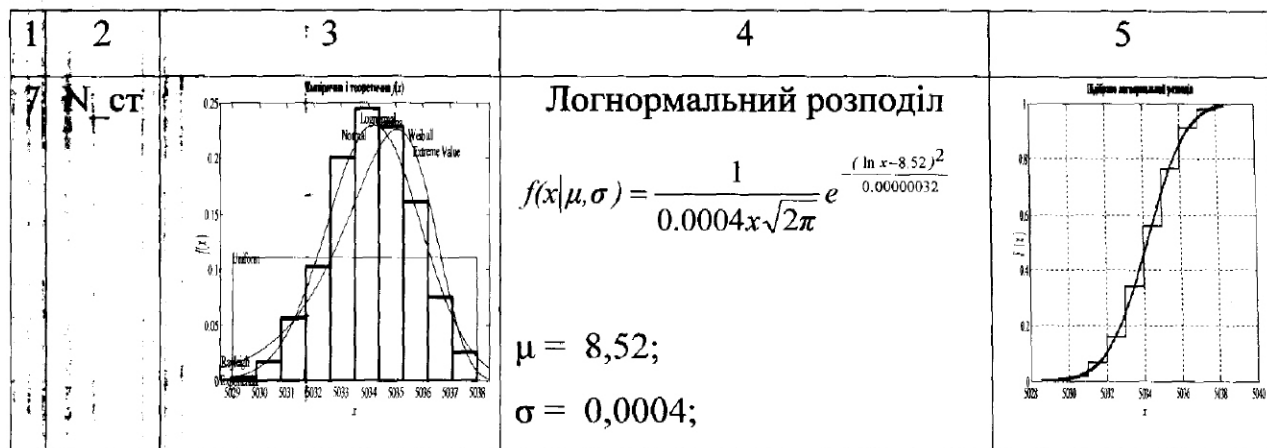
ГПА

№	Параметр	Гістограма, емпірична та теоретична щільність розподілу	Закон розподілу	Теоретична і емпірична функція розподілу
1	2	3	4	5
1	dP_kon		<p>Логнормальний розподіл</p> $f(x \mu, \sigma) = \frac{1}{0.008x\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(\ln x + 1.78)^2}{0.0001}}$ $\mu = \log(m^2 / \sqrt{v + m^2})$ $\sigma = \sqrt{\log(v / m^2 + 1)}$ <p>m – математичне сподівання; v – дисперсія. $\mu = -1.78$; $\sigma = 0,008$.</p>	
2	E		<p>Розподіл вейбулла</p> $f(x a, b) = 1663.88 \left(\frac{x}{1.4}\right)^{2328.43} e^{-\left(\frac{x}{1.4}\right)^{2329.43}}$ <p>a – коефіцієнт масштабу, $a > 0$, b – коефіцієнт форми, $b > 0$. $a = 1,4$; $b = 2329,43$.</p>	

Продовження додатку Б

1	2	3	4	5
3	Gg_ P		<p>Логнормальний розподіл</p> $f(x \mu, \sigma) = \frac{1}{0.02x\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(\ln x - 3.93)^2}{0.0008}}$ <p>$\mu = 3,93; \sigma = 0,02.$</p>	
4	Gg_ Z		<p>Логнормальний розподіл</p> $f(x \mu, \sigma) = \frac{1}{0.03x\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(\ln x - 2.96)^2}{0.0018}}$ <p>$\mu = 2,96;$ $\sigma = 0,03;$</p>	
5	Gv_ P		<p>Логнормальний розподіл</p> $f(x \mu, \sigma) = \frac{1}{0.03x\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(\ln x - 3.65)^2}{0.0018}}$ <p>$\mu = 3,65;$ $\sigma = 0,03;$</p>	
6	Кро mpag		<p>Логнормальний розподіл</p> $f(x \mu, \sigma) = \frac{1}{0.014x\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(\ln x - 3.63)^2}{0.0004}}$ <p>$\mu = 3,63;$ $\sigma = 0,014.$</p>	

Продовження додатку Б



ДОДАТОК В

**Перелік давачів та обчислювальних компонент та їхні метрологічні
характеристики**

Назва вимірювального каналу та місце встановлення давачів на об'єкті	Діапазон вимірювання		Тип давача	Довірча границя допустимої зведеної похибки	
	Повний (робочий)	Сигналізац її		Електричного тракту	Давача
1	2	3	4	5	6
Тиск газу на вході нагнітача, kgc/cm^2	0...100		STG97 L-E1G	$\pm 0,2$	$\pm 0,25$
Тиск газу на виході нагнітача, kgc/cm^2	0...100		STG97 L-E1G	$\pm 0,2$	$\pm 0,25$
Перепад тиску на конфузорі нагнітача kgc/cm^2	0...1,0		STD92 4-A1A	$\pm 0,2$	$\pm 0,25$
Вібропереміщення вертикальне задньої опори нагнітача, мкм	0...250	60...80	Metrix	$\pm 0,5$	$\pm 1,0$
Вібропереміщення горизонтальне передньої опори нагнітача, мкм	0...250	60...80	Metrix	$\pm 0,5$	$\pm 1,0$

Продовження табл.

1	2	3	4	5	6
Вібропереміщення вертикальне передньої опори нагнітача, мкм	0...250	60...80	Metrix	±0,5	±1,0
Осьовий зсув нагнітача, мм	-0,75...0,75	-0,5...0,6... 0,5,0,6	Metrix	±0,5	±1,0
Частота обертання ротора силової турбіни (нагнітача)	0...12500		Metrix	±0,2	±1,0
Сигнал керування дозатором газу, %	0...100		Metrix	±0,2	±1,0
Сигнал керування антипомпажним клапаном, %	0...100			±0,2	±1,0
Позиція виконавчого механізму дозатора газу, %	0...100			±0,2	±1,0
Обчислювальні компоненти					
Об'ємна продуктивність нагнітача м ³ /хв	0...1000			±3,0	±3,0
Зведена продуктивність нагнітача м ³ /хв.	0...1000			±3,0	±3,0

Продовження табл.

1	2	3	4	5	6
Ступінь стиснення	0,9...1,5			$\pm 3,0$	$\pm 3,0$
Потужність на муфті приводу, кВт	0...16000			$\pm 3,0$	$\pm 3,0$
Політропний коефіцієнт корисної дії, %	0...100			$\pm 3,0$	$\pm 3,0$
Запас помпажу, %	0...100			$\pm 3,0$	$\pm 3,0$

ДОДАТОК Г

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Наукові праці, в яких опубліковані основні наукові результати дисертації:

1. Фешанич Л. І., Олійник А. П. Метод виявлення явища помпажу у відцентрових нагнітачах газоперекачувальних агрегатів. *Вісник Національного технічного університету "Харківський політехнічний інститут": Механіко-технологічні системи та комплекси*. Харків : НТУ "ХПІ", 2017. № 19 (1241). С. 114-119. (Входить до міжнародної наукометричної бази *Ulrich's Periodicals Directory*).

Автором запропоновано використання фазових портретів для ідентифікації явища помпажу.

2. Фешанич Л. І. Явище помпажу у відцентрових нагнітачах газоперекачувальних агрегатів. *Науково-технічний журнал: Методи та прилади контролю якості*. Івано-Франківськ, 2017. № 1 (38). С. 64-68.

3. Фешанич Л. І., Семенцов Г. Н. Проблема відмови давачів і їх колективного спрацювання при експлуатації системи автоматичної системи антипомпажного керування. *Науково-технічний журнал: Методи та прилади контролю якості*. Івано-Франківськ, 2016. № 2 (37). С. 14-19.

Автором розроблено схему роботи комплексного давача первинної інформації.

4. Sementsov H. N., Feshanych L. I. Informative technology of early diagnosis of deviated gas compression process from normal gas process. *Науковий вісник Національного гірничого університету*. 2016. № 5. С. 137-143. (Входить до міжнародних наукометричних баз *SciVerse Scopus*, *Index Copernicus Journals Master List*, *Ulrich's Web Global Serials Directory*, *Research Bib Journal Database*)

Автором запропоновано технологію раннього виявлення відхилення процесу компримування газу від нормальних робочих характеристик.

5. Семенцов Г. Н., Фешанич Л. І. Інформаційна технологія підвищення швидкодії автоматичного захисту компресора від помпажу на основі злиття даних. *Вісник національного технічного університету "Харківський політехнічний інститут": Механіко-технологічні системи та комплекси*. Харків, 2015. № 5. С. 68 – 82.

Автором проаналізовано існуючі інформаційні технології, запропоновано структурну схему системи антипомпажного захисту ГПА.

6. Фешанич Л. І. Експериментальна оцінка статистичних характеристик вібрації передньої опори нагнітача газоперекачувального агрегату / Л. І. Фешанич // *Технологічний аудит та резерви виробництва*. Харків, 2014. Том 6, № 4(20). С. 31-33. (Входить до міжнародних наукометричних баз *Ulrich's Periodicals Directory, DRIVER, Bielefeld Academic Search Engine (BASE), Index Copernicus, WorldCat, PISC, Directory of Open Access Journals (DOAJ), EBSCO, ResearchBib, American Chemical Society, Directory Indexing of International Research Journals, Directory of Research Journals Indexing (DRJI), CrossRef, Open Academic Journals Index (OAJI), Sherpa/Romeo*).

7. Семенцов Г. Н., Фешанич Л. І. Аналіз законів розподілу випадкових процесів, отриманих в результаті багатопараметричного злиття даних. *Науковий журнал «Технологічні комплекси»*. Луцьк, 2014. № 2(10). С. 43-49. (Входить до міжнародних наукометричних баз *Index Copernicus, Ulrich's Periodicals Directory, PISC, Directory Indexing of International Research Journals*).
Автором досліджено справедливість теореми Ляпунова щодо нормального розподілу сумарного сигналу.

8. Давиденко Л. І. Експериментальна оцінка законів розподілу випадкових процесів у системі автоматичного керування газоперекачувальним агрегатом дотискувальної компресорної станції підземного сховища газу. *Всеукраїнський науково-технічний журнал: Нафтогазова енергетика*. Івано-Франківськ, 2014. № 1 (21). С. 64-69.

9. Семенцов Г. Н., Давиденко Л. І. Розвиток інформаційного забезпечення системи автоматичного антипомпажного захисту та регулювання

газоперекачувального агрегату. Восточно-Европейский журнал передовых технологий. Математическое и информационное обеспечение компьютерно-интегрированных систем управлений. – Харьков, 2014. – № 4/11(70). – С. 20-25.

(Входить до міжнародних наукометричних баз Ulrich's Periodicals Directory, DRIVER, Bielefeld Academic Search Engine (BASE), Index Copernicus, WorldCat, PISC, Directory of Open Access Journals (DOAJ), EBSCO, ResearchBib, American Chemical Society, Directory Indexing of International Research Journals, Directory of Research Journals Indexing (DRJI), CrossRef, Open Academic Journals Index (OAJI), Sherpa/Romeo).

Автором запропоновано узагальнену функціональну структуру системи антипомпажного регулювання та захисту ВН ГПА.

10. Sementsov G. N., Blyaut J. E., Davydenko L. I. Metododi di identificazione automatica del reale dei Forniture pressioni compressori centrifughi prestazioni trattamento del gas unit. *Italian Academic and Scientific Journal*. 2014. Issue 8(17). p.100-105.

Автором запропоновано інформаційну модель для витратно-напірних характеристик.

11. Sementsov G. N., Blyaut J. E., Davydenko L. I. Metodo di identificazione delle caratteristiche di consumo pressione di unità di compressione gas centrifughe. *Italian Academic and Scientific Journal*. 2014. Issue 5(14). p. 372-376.

12. Давиденко Л. І., Семенцов Г. Н. Методи злиття даних для виявлення явища помпажу у відцентрових нагнітачах газоперекачувальних агрегатів. *Науковий вісник Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу*. Івано-Франківськ, 2013. № 2(35). С.174-181.

Автором проведено детальний аналіз методів злиття даних.

Наукові праці, що засвідчують апробацію матеріалів дисертації:

13. Фешанич Л. І. Виявлення явища помпажу у відцентрових нагнітачах газоперекачувальних агрегатів. *Автоматика – 2017 : XXIV Міжнародна конф. з автоматичного управління*, 13-16 вересня 2017. Київ, 2017. С. 123-124.

14. Фешанич Л. І., Семенцов Г. Н. Удосконалення структури системи автоматичного антипомпажного захисту відцентрового нагнітача газоперекачувального агрегату. *Автоматика – 2016* : XXIII Міжнародна конф. з автоматичного управління, 22-23 вересня 2016. Суми, 2016. – С. 74-75.

Автором запропоновано функціональну структуру, що реалізує спосіб автоматичного захисту ГПА.

15. Фешанич Л. І. Синтез спостерігача класів станів відцентрового нагнітача газоперекачувального агрегату за умов невизначеності. *Технологічні комплекси – 2016* : VI Міжнародна науково-технічної конференції, 26-28 травня 2016. Луцьк, 2016. – С. 31-32.

16. Feshanych L. I., Sementsov G. N. Intelligent analysis of multiparameter data based on the adaptive neuro-fuzzy system. *Data Steam Mining and Processing* : IEEE First International Conference, 23-27 August 2016. Lviv, 2016. p. 117-119.

Автором запропоновано нейро-нечітку систему для вирішення проблеми ідентифікації явища помпажу на ранніх стаціях.

17. Фешанич Л. І., Семенцов Г. Н. Модель Multiple Input-Multiple Output газоперекачувального агрегату. *Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології – 2016* : III Міжнародна наук.-практ. конф. молодих учених, аспірантів і студентів, 20-21 квітня 2016. Київ, 2016. С. 104-106.

Автором запропоновано модель Multiple Input – Multiple Output ГПА як багатовимірний об'єкт.

18. Семенцов Г. Н., Фешанич Л. І. Використання технології злиття даних на основі JDL-моделі для підвищення ефективності антипомпажного захисту газоперекачувальних агрегатів. *Автоматика – 2015* : XXII Міжнародна конф. з автоматичного управління, 10-11 вересня 2015. Одеса, 2015. С. 166-167.

Автором запропоновано технологію злиття контрольованих параметрів на основі JDL-моделі.

19. Фешанич Л. І. Використання DF-методів для вдосконалення інформаційного забезпечення системи автоматичного керування. *Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології – 2015* : II Міжнародна

наук.-практ. конф. молодих учених, аспірантів і студентів, 15-16 квітня 2015. Київ, 2015. – С.104-106.

20. Семенцов Г. Н., Фешанич Л. І. Використання DF-методів для моніторингу технічного стану газоперекачувальних агрегатів. *Обчислювальний інтелект* : III Міжнародна наук.-практ. конф., 12-15 травня 2015. Черкаси, 2015. С. 254-256.

Автором проаналізовано сучасні технології для моніторингу технічного стану ГПА.

21. Семенцов Г. Н., Фешанич Л. І. Інформаційна технологія діагностування стану газоперекачувального агрегату на основі злиття даних. *Проблеми розвитку впровадження інформаційних технологій в наукову і інноваційну сферу освіти* : XI Міжнародна конф., 28 листопада 2014. Дніпропетровськ, 2014. С. 2-4.

Автором розроблено загальну схему організації процедури злиття даних.

22. Семенцов Г. Н., Фешанич Л. І. Інформаційна технологія на основі злиття даних для діагностування технічного стану газоперекачувальних агрегатів. *Сучасні прилади, матеріали і технології для неруйнівного контролю і технічної діагностики машинобудівного і нафтогазопромислового обладнання* : 7-ма Міжнародна наук.-техн. конф. і виставка, 25-28 листопада 2014. Івано-Франківськ, 2014. С. 112-114.

Автором запропоновано структуру системи антипомпажного регулювання та захисту ВН ГПА, що побудована з використанням технології злиття даних.

23. Давиденко Л. І. Надлишкові вимірювання та злиття даних в системі антипомпажного регулювання та захисту відцентрового нагнітача. *Автоматика – 2014* : XXI Міжнародна конф. з автоматичного управління, 23-27 вересня 2014. Київ, 2014. С. 50-52.

24. Давиденко Л. І. Ідентифікація нечіткої міри за обмежень, які накладаються експертом на параметри інтеграла Шоке. *Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології – 2014* : I Міжнародна наук.-практ. конф.

молодих учених, аспірантів і студентів, 16-17 квітня 2014. Київ, 2014. – С. 23-24.

25. Давиденко Л. І., Семенцов Г. Н. Виявлення явища помпажу відцентрових нагнітачів газоперекачувальних агрегатів на основі методу злиття даних. *Нафтогазова енергетика – 2013* : Міжнародна наук.-техн. конф., 7–11 жовтня 2013. Івано-Франківськ, 2013. С. 460-463.

Автором запропоновано застосування технології злиття даних для опрацювання інформації.

ДОДАТОК Д**ЗАТВЕРДЖУЮ:**

Проректор з науково-педагогічної
роботи Івано-Франківського
національного технічного
університету нафти і газу,
д-р техн. наук, проф.


 О. М. Мандрик
« 5 » 11 2015 р.

АКТ

про впровадження у навчальний процес наукових результатів дисертаційної роботи аспірантки кафедри автоматизації технологічних процесів і моніторингу в екології Фешанич Л.І. «Вдосконалення інформаційного забезпечення системи автоматичного керування газоперекачувальним агрегатом для підвищення надійності компримування газу»

Ми, що нижче підписалися, директор інституту інформаційних технологій, канд. техн. наук, доцент Чигур І.І., завідувач кафедри автоматизації технологічних процесів і моніторингу в екології, докт. техн. наук, професор Семенцов Г.Н., аспірантка кафедри Фешанич Л.І., склали цей акт у тому, що матеріали дисертації «Вдосконалення інформаційного забезпечення системи автоматичного керування газоперекачувальним агрегатом для підвищення надійності компримування газу» Фешанич Л.І. впроваджені у навчальний процес при вивченні дисципліни «Автоматизація технологічних процесів в галузі», модуль ППМ05, змістовний модуль ЗМ2, навчальний елемент НЕ1 «Інформаційне забезпечення системи автоматичного керування газоперекачувальним агрегатом на засадах DF-технологій для підвищення надійності компримування газу» для студентів спеціальності 8.050202 – Автоматизоване управління технологічними процесами.

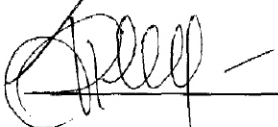
Директор інституту інформаційних технологій,
канд. техн. наук, доцент

 І.І. Чигур

Завідувач кафедри автоматизації технологічних
процесів і моніторингу в екології,
д-р техн. наук, професор

 Г.Н. Семенцов

Аспірантка

 Л.І. Фешанич

ДОДАТОК Е

ЗАТВЕРДЖУЮ:

Директор ТзОВ «МІКРОЛ»
Б. С. Демчина
« 11 » 2015 р.

АКТ

про впровадження наукових результатів дисертаційної роботи аспірантки кафедри автоматизації технологічних процесів і моніторингу в екології Фешанич Л.І.
«Вдосконалення інформаційного забезпечення системи автоматичного керування газоперекачувальним агрегатом для підвищення надійності компримування газу»,
представленої на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.13.07 – «Автоматизація процесів керування»

Комісія у складі представників ТзОВ «МІКРОЛ» - головного інженера ТзОВ «МІКРОЛ» Слободяна Романа Йосифовича, заступника директора ТзОВ «МІКРОЛ» Лопуха Володимира Володимировича та представників Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу – завідувача кафедри автоматизації технологічних процесів і моніторингу в екології, докт. техн. наук, професора Семенцова Георгія Никифоровича, аспірантки Фешанич Лідії Ігорівни склали даний акт про те, що ТзОВ «МІКРОЛ» прийняло до використання та впровадження наступні результати досліджень Фешанич Л. І.:

- модель інтелектуальної системи виявлення відхилень технологічних процесів від нормальних робочих характеристик за умов невизначеності, що побудована на засадах інформаційної технології Data Fusion з використанням гібридної фаззі-нейро архітектури.

Очікувані результати: розроблена модель може бути використана для вирішення задач прогнозування та ідентифікації, є простою в обчисленні й зручною у реалізації, що дозволяє використати її для вирішення задач у реальному часі.

Від ТзОВ «МІКРОЛ»:

Головний інженер ТзОВ «МІКРОЛ»
/Слободян Р. Й./

Заступник директора ТзОВ «МІКРОЛ»
/Лопух В. В./

Від ІФНТУНГ:

Завідувач кафедри автоматизації технологічних процесів і моніторингу в екології, докт. техн. наук, професор
Семенцов Г.Н.

Аспірантка
Фешанич Л.І.

ДОДАТОК Є



ЗАТВЕРДЖУЮ:

Боловний інженер філії

УМГ «ПРИКАРПАТТРАНСГАЗ»

М. Д. Степ'юк

2015 р.

АКТ

**про впровадження наукових результатів дисертаційної роботи аспірантки кафедри автоматизації технологічних процесів і моніторингу в екології Фешанич Л.І.
«Вдосконалення інформаційного забезпечення системи автоматичного керування газоперекачувальним агрегатом для підвищення надійності компримування газу»,
представленої на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.13.07 – «Автоматизація процесів керування»**

Комісія у складі представників філії УМГ «ПРИКАРПАТТРАНСГАЗ» ПАТ «УКРГАЗПРОМ», начальника Долинського ЛВУМГ Бойка Василя Тарасовича, начальника служби КВПІА Долинського ЛВУМГ Тисяка Володимира Михайловича та представників Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу – завідувача кафедри автоматизації технологічних процесів і моніторингу в екології, докт. техн. наук, професора Семенцова Георгія Никифоровича, аспірантки Фешанич Лідії Ігорівни склали даний акт про те, що філія УМГ «ПРИКАРПАТТРАНСГАЗ» прийняло до використання та впровадження наступні результати досліджень Фешанич Л. І.:

- методику раннього виявлення відхилення процесу компримування газу від нормальних робочих характеристик, що побудована на основі інформаційної технології Data Fusion;
- структуру системи автоматичного антипомпажного захисту відцентрових нагнітачів газоперекачувальних агрегатів з газотурбінним приводом.

Очікуванні результати: створюються передумови раннього виявлення передпомпажного стану системи «ВН ГПА – трубопровід» за умов апіорної невизначеності зовнішніх збурень та робастного захисту ГПА від помпажу за умов статистичної невизначеності збурень і завод.

Результатом впровадження буде зниження кількості аварійних зупинок агрегату, а також позатипових ремонтів обладнання, викликаних виникненням помпажних явищ у нагнітачах, що дасть значну економію паливного, пускового та стравлюваного газу.

Від УМГ «ПРИКАРПАТТРАНСГАЗ»:

Начальник Долинського ЛВУМГ

/Бойко В. Т./

Начальник служби АК ВПТТМ і АСУ
Долинського ЛВУМГ

/Тисяк В. М./

Від ІФНТУНГ:

Завідувач кафедри автоматизації
технологічних процесів і моніторингу в
екології, докт. техн. наук, професор
Семенцов Г.Н.

Аспірантка

Фешанич Л.І.