

681.51.015:622.691.4.052.012(043)

Ф47

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

**ФЕШАНИЧ ЛІДІЯ ІГОРІВНА**



УДК 681.5.015:622.691.4

**УДОСКОНАЛЕННЯ ІНФОРМАЦІЙНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ СИСТЕМИ  
АНТИПОМПАЖНОГО ЗАХИСТУ ВІДЦЕНТРОВОГО НАГНІТАЧА  
ГАЗОПЕРЕКАЧУВАЛЬНОГО АГРЕГАТУ НА ЗАСАДАХ ШТУЧНОГО  
ІНТЕЛЕКТУ**

Спеціальність 05.13.07 – автоматизація процесів керування

**Автореферат**

дисертації на здобуття наукового ступеня  
кандидата технічних наук

**Івано-Франківськ – 2018**



Дисертацією є рукопис

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

**Науковий керівник:**

доктор технічних наук, професор  
**Семенцов Георгій Никифорович**,  
Івано-Франківський національний технічний  
університет нафти і газу,  
завідувач кафедри автоматизації та комп'ютерно-  
інтегрованих технологій

**Офіційні опоненти:**

доктор технічних наук, професор  
**Северин Валерій Петрович**,  
Національний технічний університет «Харківський  
політехнічний інститут»,  
професор кафедри системного аналізу та  
інформаційно-аналітичних технологій

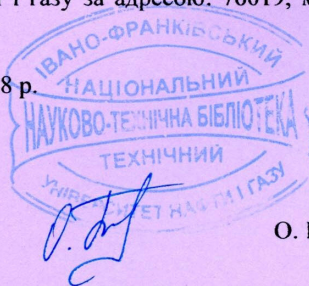
кандидат технічних наук, доцент  
**Цвіркун Леонід Іванович**,  
Національний технічний університет «Дніпровська  
політехніка»,  
доцент кафедри автоматизації та комп'ютерних  
систем

Захист відбудеться «26» жовтня 2018 р. о 10<sup>00</sup> годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 20.052.03 Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу за адресою: 76019, м. Івано-Франківськ, вул. Карпатська, 15.

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

Автореферат розісланий «24» вересня 2018 р.

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



О. Б. Барна



an2734

**ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ**

**Актуальність теми.** Важливим науково-практичним завданням 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 (ВН) 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: Ю. Д. Акульшина, В. Г. Веселовського, О. В. Городецького, В. М. Гуренка, В. В. Казакевича, Т. Downer, I. R. Baher, E. O. King, I. F. Kuhlberg, H. Pearson, D. E. Shepperd, Ю. Є. Бляуга, М. В. Беккера, С. Г. Гіренка, М. О. Петеша, А. Ф. Репеша, Г. Н. Семенцова, О. В. Сукача, Р. Я. Шимка та інших. Проте науковий аналіз публікацій і досліджень показав, що відомі методи антипомпажного захисту не 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 – удосконалення динамічного методу автоматичного антипомпажного захисту системи “відцентровий нагнітач

an 2734

газоперекачувального агрегату – трубопровід” дотискувальної компресорної станції підземного сховища газу на основі раннього виявлення відхилень технологічного процесу компримування газу від норми на засадах інформаційної технології злиття даних. Досягнення поставленої мети здійснюється вирішенням таких основних задач:

- 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 функціональну 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 одержаних результатів** 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. Наукова новизна визначається наступними положеннями:

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 багатовимірного 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.

**Практичне значення одержаних результатів.** Запропонований у роботі метод автоматичного антипомпажного захисту системи “ВН ГПА – ТП” дозволяє проектувати в складі системи автоматичного керування ГПА ДКС ПСГ контури систем автоматичного захисту від помпажу, робастні щодо порушення апріорних статистичних припущень та 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-фаззі 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 дисципліни “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 справедливості 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 стадіях; [17] – запропоновано модель МІ-МО ГПА як багатовимірної об'єкта; [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 Steam 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 рисунки; 2 таблиці; список використаних джерел, що включає 121 найменування та займає 13 сторінок; 7 додатків на 21 сторінках.

## ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі обґрунтовано актуальність теми, сформувано мету і завдання дослідження, розкрито наукову новизну і практичне значення одержаних результатів. Наведено відомості про апробацію основних положень роботи та публікації, зазначено особистий внесок здобувачки.

У першому розділі оглянуто стан проблеми інформаційного забезпечення систем автоматичного антипомпажного захисту ВН ГПА, що функціонують у складі САК ГПА як підсистеми.

Проаналізовано стан проблеми антипомпажного захисту ВН ГПА і розглянуто існуючі підходи до її вирішення. Проаналізовано відомі системи антипомпажного захисту, що найбільш поширені на компресорних станціях. Показано, що ці методи і системи мають свої недоліки і переваги та містять обмеження при розв’язанні задач, де спостереження за великою кількістю випадкових параметрів, що характеризують помпаж, надходять на опрацювання в режимі on-line. Науковий аналіз публікацій і досліджень показав, що відомі методи антипомпажного захисту не цілком відповідають сучасному рівню автоматизації та інформаційного забезпечення систем автоматичного керування ГПА. Вони мають істотні обмеження, серед яких неможливість використання

інформації від багатовимірної системи контролю САК ГПА для задач антипомпажного захисту в реальному часі.

Розглянуто переваги і недоліки найбільш поширених методів злиття (Data Fusion) даних (Демптера-Шафера, ШНМ, нечіткого інтегралу, фільтру Калмана, ANFIS та ін.). Показано, що для об'єднання інформації від різних давачів САК ГПА для надання допомоги в реалізації алгоритму відстеження об'єкта доцільно використовувати мережу ANFIS внаслідок наявності таких переваг як стійкість, надійність, нелінійність перетворення, узагальнювальна здатність.

На основі проведеного аналізу визначено задачу дослідження, що полягають у розроблення системи і методів злиття даних у САК ГПА на основі технології Data Fusion для розв'язання задач антипомпажного захисту та керування в режимі on-line.

**Другий розділ** присвячено вдосконаленню інформаційного забезпечення САК ГПА та розробленню методу і алгоритмічної структури системи автоматичного антипомпажного регулювання та захисту системи "ВН ГПА – ТП" на засадах інформаційної технології Data Fusion.

Описано фізичну модель взаємодії механічних, теплових і газодинамічних процесів у динамічній системі САК ГПА з газотурбінним приводом. Показано, що компримування природного газу є сукупністю трьох взаємодіючих підсистем: механічної, теплової і газодинамічної. Режими їхньої роботи і показники залежать від керуючих впливів та різноманітних збурювальних факторів (технічний стан відцентрового нагнітача, хімічний склад реального транспортованого газу, температура навколишнього середовища, атмосферний тиск та ін.), що мають випадковий характер. Зміна факторів веде до створення складних динамічних процесів, які відбиваються на технологічних, енергетичних та економічних показниках роботи компресорної станції.

Проаналізовано зв'язки математичної моделі процесу компримування газу, що дало змогу сформулювати алгоритм функціонування об'єкта керування з урахуванням обмежень окремих компонентів векторів стану, керувальних дій і зовнішніх впливів у вигляді векторного диференціального рівняння

$$D(s)\bar{x}(t) = K(s)\bar{y}(t), \quad (1)$$

де  $D(s), K(s)$  – матриці операторів,  $s$  – оператор диференціювання,  $\bar{y}(t), \bar{x}(t)$  – вектори вхідних і вихідних змінних.

Запропоновано модель типу Multi Input – Multi Output (MI-MO) для системи "ВН ГПА – ТП", як багатовимірною об'єкта антипомпажного керування і захисту (рис. 1).

Кожну вихідну змінну такої системи розглядають як суму

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

Схемі (рис. 1) відповідає операторне рівняння

$$\bar{x}(s) = W(s)\bar{y}(s), \quad (3)$$

де  $W(s)$  – матриця функції передачі.



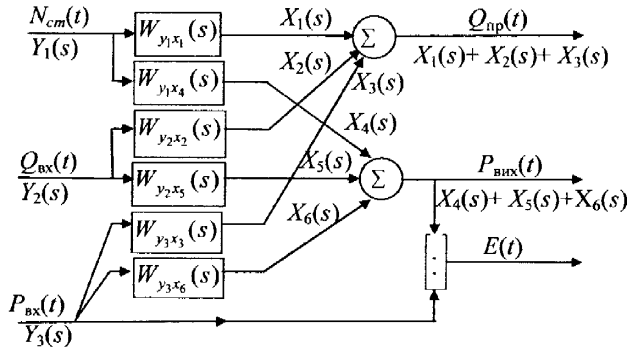


Рис. 1. Модель МІ-МО системи “ВН ГПА – ТП” як багатовимірного об’єкта автоматичного антипомпажного керування і захисту:  $N_{cm}(t)$  – частота обертання силової турбіни,  $Q_{er}(t)$  – об’єм газу на вході нагнітача, який надходить з виходу підземного сховища газу, або ГПА 1 ступеня,  $P_{ар}(t)$  – тиск газу на вході відцентрового нагнітача,  $Q_{нр}(t)$  – продуктивність нагнітача,  $P_{внх}(t)$  – тиск газу на виході нагнітача,  $E(t)$  – ступінь підвищення тиску газу  $E(t) = P_{внх}(t) \cdot P_{ар}(t)^{-1}$ ;  $X_1(s) - X_6(s)$  – зображення за Лапласом вихідних параметрів,  $Y_1(s) - Y_3(s)$  – зображення за Лапласом вхідних параметрів

Сформульовано постановку задачі синтезу спостерігача станів системи “ВН ГПА – ТП” за умов невизначеності та запропоновано структуру системи автоматичного антипомпажного захисту її у змінних стану (рис. 2).

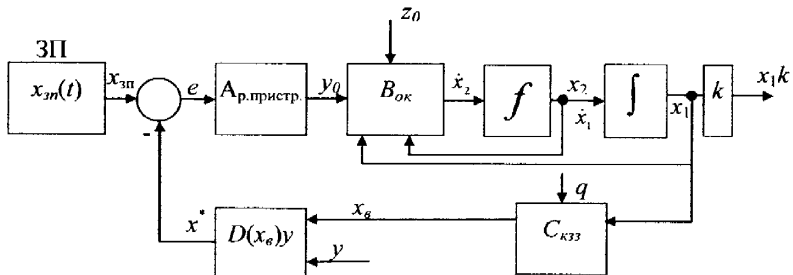


Рис. 2. Структура замкненої системи автоматичного антипомпажного регулювання та захисту системи “ВН ГПА – ТП”: ЗП – задаючий пристрій

Динамічну систему (рис. 2) описано рівняннями:

$$\left. \begin{aligned} \dot{x}_2 &= B_{ок}(x_2, x_1, y_0, z_0), \\ x_g &= C_{кзз}(x_1, q), \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

де  $B_{ок}(\cdot)$  і  $C_{кзз}(\cdot)$  – перетворення, від яких залежить від типів ВН ГПА, як ОК, і контуру зворотного зв’язку (КЗЗ);  $y_0$  – вхід об’єкту 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.

На стан об'єкта накладено обмеження

$$x_s \in \{x_0, x_1\}, \quad (5)$$

$x_{ii}$ ,  $\Pi = \overline{0,1}$  є можливим значенням змінної стану ОК (помпаж, відсутність помпажу).

При обмеженні (5) може бути справедлива одна із гіпотез про клас технічного стану ВН як ОК, в якому можливе явище помпажу:

$$H_{\Pi} : x_s = (1 - \Pi)C_{кзз}(x_0, q) + \Pi \cdot C_{кзз}(x_1, q); \quad \Pi = \overline{0,1}, \quad (6)$$

де  $\Pi$  – 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  $x = x_1$  (помпаж).

Враховуючи, що ВН ГПА з газотурбінним приводом типу Ц-6,3 за експериментальними даними є об'єктом другого порядку і має функцію передачі по каналу  $Q \rightarrow E$ , де  $Q$  – продуктивність нагнітача,  $E$  – ступінь підвищення тиску газу

$$W_{ок}(s) = \frac{k}{T_1 T_2 s^2 + (T_1 + T_2)s + 1}, \quad (10)$$

алгоритмічну структуру системи автоматичного антипомпажного захисту ВН ГПА як багатовимірною об'єкта із спостереженням класів його станів синтезовано у вигляді алгоритмічної структури САК у змінних стану (рис. 3).

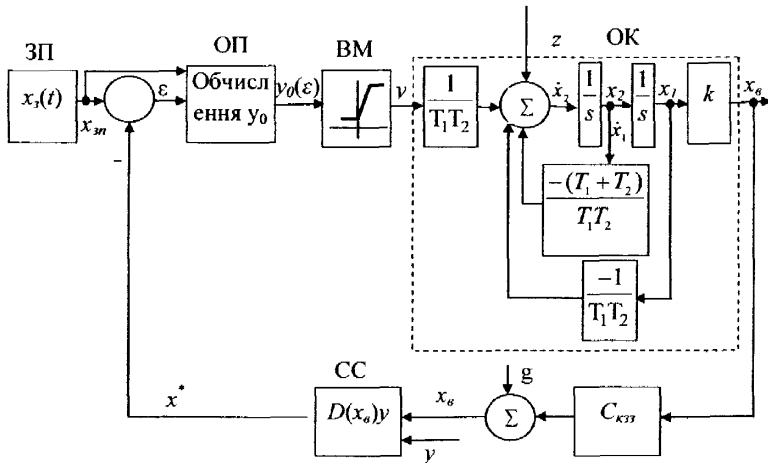


Рис.3 Алгоритмічна структура системи автоматичного антипомпажного захисту системи “ВН ГПА – ТП”: ОП – обчислювальний пристрій; ВМ – виконавчий механізм системи антипомпажного захисту; ОК – об'єкт керування;  $C_{кзз}$  – перетворення, вид якого залежить від типу контуру зворотного зв'язку системи

спостереження; СС – спостерігач станів системи “ВН ГПА – ТП”;  $\bar{P} = 0,1$   
(нормальний режим експлуатації ВН ГПА; помпаж)

Розроблено узагальнену функціональну структурну систему антипомпажного захисту системи “ВН ГПА – ТП” на засадах ANFIS, яка дозволяє покращити точність діагностування явища помпажу у ВН ГПА, підвищити ефективність та оперативність операторного керування ГПА шляхом використання сучасних технічних засобів контролю і керування, забезпечити надійність роботи ГПА.

Третій розділ присвячено експериментально-теоретичним дослідженням запропонованого методу оброблення інформаційних сигналів у САК ГПА. За результатами досліджень статистичних характеристик основних факторів, що характеризують роботу існуючої системи автоматичного антипомпажного захисту підсистеми “ВН ГПА – ТП”, а саме: перепаду тиску на звужувальному пристрої перед нагнітачем, швидкості обертання силової турбіни, горизонтальної вібрації передньої опори нагнітача, вертикальної вібрації передньої опори нагнітача, горизонтальної вібрації задньої опори нагнітача, вертикальної вібрації задньої опори нагнітача, ступеня підвищення тиску, осевого зсуву нагнітача, коефіцієнта помпажу визначено такі характеристики сигналів як гістограма, емпірична та теоретична щільність розподілу, закон розподілу, емпірична та теоретична функція розподілу тощо. Встановлено закон 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.

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

Рівняння, що описують рух рідини, записується у вигляді:

$$\begin{cases} L\dot{Q} = F_1(Q) - p \\ C\rho = Q - F(p), \end{cases} \quad (11)$$

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

де  $\rho$  – густина,  $l, s$  – характерні розміри та площі робочої частини,  $Q_0$  – початкові витрати,  $\rho_0$  – 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 розв'язання системи (11) є можливим лише за умови, коли всі зазначені функції є відомими. Часто це є задачею, що вирішується 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  $t - p(t), Q(t)$ .

Пропонується наступна модель визначення зон втрати стійкості розв'язків системи диференціальних рівнянь типу (11), а отже умов, виникнення помпажу: нехай у загальному випадку праві частини системи (11) розкладаються в ряд Тейлора і записуються з утриманням членів, вищих за квадратичні. Такий підхід є вмотивованим 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 систему (11) записують у вигляді:

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

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

$$p(0) = p_0; Q(0) = Q_0. \quad (13)$$

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

Якщо відомими є результати експериментального визначення функції  $p_r(t)$  та  $Q_r(t)$ , одержані протягом деякого часу  $t \in [0, T]$ , де  $T$  – час завершення спостережень, то підставивши в систему (12) одержуємо дві нев'язки:

$$\begin{cases} R_1(t, A_1, \dots, A_6) = \dot{p}_r(t) - A_1 - A_2 p_r - A_3 Q_r - A_4 p_r^2 - A_5 p_r Q_r - A_6 Q_r^2 \\ R_2(t, A_7, \dots, A_{12}) = A_7 - A_8 p_r - A_9 Q_r + A_{10} p_r^2 + A_{11} p_r Q_r + A_{12} Q_r^2 - \dot{Q}_r(t) \end{cases} \quad (14)$$

Значення  $A_i$ , що входять до системи (12) одержують із використанням методу зважених нев'язок у формі Гальоркіна. Зазначену систему нелінійних рівнянь необхідно дослідити на стійкість їхнього положення рівноваги. Зазначені положення рівноваги знаходять шляхом розв'язку системи рівнянь та вважають, що  $\frac{dp}{dt} = 0$  та  $\frac{dQ}{dt} = 0$ :

$$\begin{cases} A_1^E + A_2^E p + A_3^E Q + A_4^E p^2 + A_5^E p Q + A_6^E Q^2 = 0 \\ A_7^E + A_8^E p + A_9^E Q + A_{10}^E p^2 + A_{11}^E p Q + A_{12}^E Q^2 = 0 \end{cases} \quad (15)$$

Необхідність знаходження точок положення рівноваги виникає у зв'язку з тим, що явище помпажу корелює з втратою стійкості розв'язків системи (12), яка описує взаємозв'язок між величинами  $p$  та  $Q$ .

Рівняння системи (15) є рівняннями кривих другого порядку, тому можлива ситуація, за якої вона взагалі не має розв'язків над полем дійсних чисел. В такому випадку 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 (15) визначають координати точок рівноваги  $(x'_0; y'_0) i = 1, \dots, N_1$ ,  $N_1$  – кількість точок рівноваги. Подальше дослідження полягає у визначенні типу кожної особливої точки системи.

Для лінеаризованої системи (15), яка набуває вигляду:

$$\begin{cases} \frac{dx}{dt} = a'_0 x + b'_0 y \\ \frac{dy}{dt} = c'_0 x + d'_0 y \end{cases} \quad (16)$$

знаходяться власні числа матриць цих систем з відомої умови:

$$\begin{vmatrix} a'_0 - \lambda & b'_0 \\ c'_0 & d'_0 - \lambda \end{vmatrix} = 0 \quad (17)$$

$$\lambda^2 - (a'_0 + d'_0)\lambda + a'_0 d'_0 - c'_0 b'_0 = 0. \quad (18)$$

Після знаходження відповідних коренів рівняння (18)  $\lambda_1$  та  $\lambda_2$ , встановлюється тип кожної із точок положення рівноваги на основі таких положень:

1.  $\lambda_1$  та  $\lambda_2$  – дійсні:

а)  $\lambda_1, \lambda_2 > 0$  – нестійкий вузол; б)  $\lambda_1, \lambda_2 < 0$  – стійкий вузол; в)  $\lambda_1$  і  $\lambda_2$  – різних знаків – сідло.

2.  $\lambda_1$  та  $\lambda_2$  – комплексні;  $\lambda_{1,2} = \alpha \pm i\beta$ :

а)  $\alpha > 0$  – стійкий фокус; б)  $\alpha < 0$  – нестійкий фокус; в)  $\alpha = 0$  – центр.

Якщо в точці  $(x'_0; y'_0)$  – фокус, то в такому разі (залежно від початкових умов) значення  $p$  та  $Q$  знаходяться на замкнених траєкторіях фазової площини, тобто має місце коливання цих значень, отже, відповідні їх значення  $(p'_0; Q'_0)$  характеризують явища 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 (12) 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).

У четвертому розділі описано реалізацію запропонованого методу об'єднання даних у задачах антипомпажного захисту системи “ВН ГПА – ТП” за умов невизначеності зовнішніх збурень. 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 (ANFIS). При верифікації розробленої ANFIS мережі із застосуванням експериментальних даних, отримано максимальну похибку мережі, що складає 0,1.

Розв'язано практичну задачу раннього виявлень відхилення процесу (РВВП) компримування газу від нормальних робочих характеристик, що ґрунтується на багатовимірному аналізі та формуванні фазових портретів показників помпажу та їхньому порівнянні з атракторами.



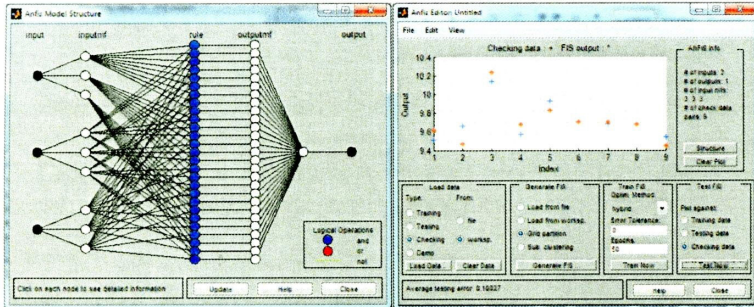


Рис. 4 Структура розробленої нейро-нечіткої мережі та її верифікації

Оскільки оператори компресорних станцій краще сприймають графічне зображення поточних операцій, то запропоновано використовувати фазові портрети нормального режиму роботи ГПА, передпомпажного стану і помпажу для візуального виявлення відхилень процесу компримування газу від нормального режиму роботи ГПА.

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

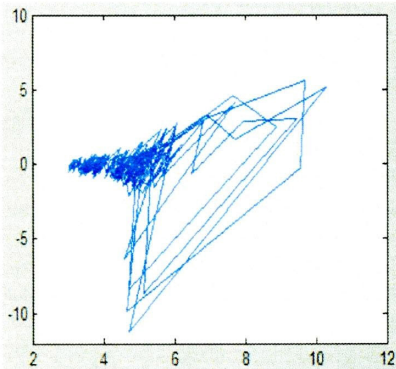


Рис. 5. Приклад фазового портрету акустичного сигналу

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

Приклад побудови фазового портрету акустичного сигналу наведено на рис. 5.

Удосконалено функціональну структуру системи автоматичного антипомпажного захисту, що реалізує запропонований спосіб захисту системи “ВН ГПА – ТП” від помпажу на засадах інформаційної технології Data Fusion.

У висновках сформульовано

наукові та практичні результати дисертаційної роботи.

У **додатках** наведено сутність способів виявлення помпажу, їх недоліки та акти щодо впровадження отриманих результатів дисертаційних досліджень.

## ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

У дисертації наведено вирішення важливої науково-прикладної задачі в галузі автоматизації процесів керування, що відповідає меті дослідження, а саме удосконалення 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.

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 обертального 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 розробки методів автоматичного антипомпажного захисту відцентрових нагнітачів газоперекачувальних агрегатів, які адаптовані до умов експлуатації на дотискувальних компресорних станціях підземних сховищ газу.

2. Встановлено закон 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 змогу виробити рекомендації щодо вибору структури системи автоматичного антипомпажного захисту, інваріантної щодо функціонального розподілу випадкового процесу, діючого в контурі зворотного зв'язку.

3. Розроблено інформаційну технологію раннього виявлення відхилення процесу компримування газу від нормальних робочих характеристик, яка ґрунтується на багатовимірному аналізі та формуванні фазових портретів показників помпажу та їхньому порівнянні з атрactorами, що дозволило

відображати та попереджувати про відхилення вимірювань від бажаного значення.

4. Запропоновано модель визначення зон втрати стійкості розв'язків системи диференціальних рівнянь. Це 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 із точок положення рівноваги, що дозволило встановити як відповідні типи точок характеризують явище помпажу або виникнення передпомпажних ефектів.

5. Удосконалено функціональну структуру схеми автоматичного антипомпажного захисту відцентрового нагнітача в складі системи автоматичного керування газоперекачувальним агрегатом дотискувальної компресорної станції підземного сховища газу, що дозволяє розпізнавати стани об'єкта керування з мінімальною ймовірністю помилки розпізнавання станів керування, окрім цього система забезпечує стабільність і безперервність перекачування газу.

6. Розроблений метод автоматичного антипомпажного захисту підсистеми “відцентровий нагнітач газоперекачувального агрегату – трубопровід” опробований на результатах експериментальних досліджень, які проведені на ДКС ПСГ “Більче-Волиця”. Отримані результати прийняті до використання та впровадження на філії УМГ «Прикарпаттрансгаз» ПАТ «Укртрансгаз» (акт про впровадження від 19.11.2015р.) та ТЗОВ «МІКРОЛ» (акт про впровадження від 17.11.2015 р.). Результати використовувалися 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 при викладанні 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 в 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 при виконанні студентами дипломних і магістерських робіт.

## 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 справедливості 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 identificazione automatica del realeled Forniture pressi one compressori centrifughi prestazi oni 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 caratteristiche di consume pressione di unità di compressione gas centrifughe. *Italian Academic and Scientific Journal*. 2014. Issue 5(14). p. 372-376.

12. Давиденко Л. І., Семенов 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., Семенов 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., Семенов 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 приклади, 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.*

## 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 – Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу, Івано-Франківськ, 2018.

Дисертацію присвячено удосконаленню 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 за рахунок використання інформаційної технології злиття даних.

В результаті багатопараметричного злиття основних параметрів, що характеризують роботу відцентрового нагнітача газоперекачувального агрегату, отримано сумарний випадковий сигнал, який підпорядковується нормальному закону розподілу. Це 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 контрольованими параметрами (тиск та витрата). Встановлено тип кожної із точок положення рівноваги та визначено як відповідні значення типу точок характеризують явище помпажу або виникнення передпомпажних ефектів.

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 та інформаційну технологію раннього виявлення відхилення процесу компримування газу від нормальних робочих характеристик, яка ґрунтується на багатовимірному аналізі та формуванні фазових портретів показників помпажу й порівнянні їх з атрactorами.

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 оберտального зриву, шляхом багатопараметричного злиття даних в контурі зворотного зв'язку.

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

## АННОТАЦИЯ

**Фешанич Л. И. Усовершенствование информационного обеспечения системы антипомпажной защиты центробежного нагнетателя газоперекачивающего агрегата на основе искусственного интеллекта. – Квалификационный научный труд на правах рукописи.**

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

Диссертация посвящена совершенствованию динамического метода автоматической антипомпажной защиты системы "центробежный нагнетатель газоперекачивающего агрегата – трубопровод" дожимной компрессорной станции подземного хранилища газа на основе раннего выявления отклонений технологического процесса компримирования газа от нормы, которая достигается за счет использования информационной технологии слияния данных.

В результате многопараметрического слияния основных параметров, характеризующих работу центробежного нагнетателя газоперекачивающего агрегата, получено суммарный случайный сигнал, который подчиняется нормальному закону распределения, что позволяет проектировать контуры систем автоматической антипомпажной защиты, инвариантные относительно функционального распределения случайного процесса действующего в контуре обратной связи.

Предложена модель определения зон потери устойчивости решений системы дифференциальных уравнений и установлено, что явление помпажа коррелирует с потерей устойчивости решений системы, описывающей взаимосвязь между контролируемыми параметрами (давление и расход). Установлен тип каждой из точек положения равновесия и определено как соответствующие значения типа точек характеризуют явление помпажа или возникновения передпомпажных эффектов.

Разработана гибридная нейро-нечеткая сеть для слияния данных и определения явления помпажа на основе адаптивной нейро-нечеткой системы вывода – Adaptive-Network-Based Fuzzy Inference System и информационная технология раннего выявления отклонения процесса компримирования газа от нормальных рабочих характеристик, основанная на многомерном анализе и формировании фазовых портретов показателей помпажа и сравнении их с аттракторами.

Усовершенствована функциональная структура системы автоматической защиты "центробежный нагнетатель газоперекачивающего агрегата – трубопровод", в процессе компримирования природного газа, которая, в отличие от существующих, реализует предложенный способ раннего выявления потери устойчивости работы этой системы вследствие начала развития вращательного срыва, путем многопараметрического слияния данных в контуре обратной связи.

**Ключевые слова:** автоматическая система антипомпажной защиты; центробежный нагнетатель; газоперекачивающий агрегат; нейро-нечеткая система; фазовая траектория.

## 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.** – On the rights of 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.

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, 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.

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 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.

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.

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