С. Савельева / Зб. наук. праць Одеськ. ін-ту сухоп. військ. – Одеса: ОІСВ. –2007. – № 14. – С. 106 – 109. **6.** Интеллектуальные методы исследования отказоустойчивости сложных технических систем в машиностроении [Текст] / *А. Л. Становский, В. М. Тонконогий, О. С. Савельева, О. Е. Плачинда* // Современные технологии в машиностроении. Сборник научных статей. – Харьков: НТУ «ХПИ». – 2007. – С. 488 – 492. **7.** *Савельева, О. С.* Экспресс-модель надежности сложных систем в САПР [Текст] / *О. С. Савельева* // Праці Одеськ. політехн. ун-ту: наук. та наук.-виробн. зб. – Одеса: ОНПУ. – 2011. – Вип. 2 (36). – С. 174 – 178. **8.** *Shier, D. R.* Network Reliability and Algebraic Structures [Text] / *D. R. Shier*. – Oxford: Clarendon Press, 1991. – 144 p. **9.** *Marquez, J. R.* Composite Importance Measures for Multistate Systems with Multistate Components / *J. R. Marquez, D. Coit* // IEEE Transactions on Reliability. – 2005. – Vol. 54. – № 3. **10.** *Chern, M. S.* On the computational complexity of reliability redundancy allocation in a series system [Text] / *M. S. Chern* // Ops. Res. Lett. – 1992. – № 11. – PP. 309 – 315.

Bibliography (transliterated): **1.** *Bondarenko, V .M., Bakirov, P. O., Nazarenko, V. G., Rimshin, V. I.* (2004). Reinforced concrete and stone structures. Moscow.: Vyisshaya shkola, 876 p. **2.** *Stanovskiy, A. L., Plachinda, O. E.* (2007). Simulation of fault tolerance of complex technical systems. Avtomatizatsiya: problemyi, idei, resheniya: mat. mezhdunar. nauchno-tehn. konf. Sevastopol, 126 – 127. **3.** *Alon, N., Spencer, J. H., Erdos, P.* (1992). The Probabilistic Method. New York: Wiley, 302 p. **4.** *Krasnozhon, S. N., Saveleva, O. S., Plachinda, O. E.* (2005). Research of firmness of regular structures. Modelirovanie v prikladnyih nauchnyih issledovaniyah: sb. mater. XII sem. Odessa, 18 – 19. **5.** *Plachinda, O. E., Stanovskiy, A. L., Saveleva, O. S.* (2007). Methods for assessing fault tolerance of complex technical systems. Zb. nauk. prats Odesk. In-tu suhop. vIysk. Odesa, № 14, 106 – 109. **6.** *Stanovskiy, A. L., Tonkonogiy, V. M., Saveleva, O. S., Plachinda, O. E.* (2007). Intelligent methods of research resiliency of complex technical systems in mechanical engineering. Kharkov: NTU «HPI», 488 – 492. **7.** Saveleva, O. S. (2011). Express model of reliability of complex systems in CAD. PratsI Odesk. polItehn. un-tu: nauk. ta nauk.-virobn. zb. Odesa, V. 2 (36), 174 – 178. **8.** *Shier, D. R.* (1991). Network Reliability and Algebraic Structures. Oxford: Clarendon Press, 144 p. **9.** *Marquez, J. R., Coit, D.* (2005). Composite Importance Measures for Multistate Systems with Multistate Components. IEEE Transactions on Reliability, vol. 54, no. 3. **10.** *Chern, M. S.* (1992). On the computational complexity of reliability redundancy allocation in a series system. Ops. Res. Lett, № 11, 309 – 315.

Надійшла (received) 28.02.2015

УДК 681.513.52:622.691.4

Г. Н. СЕМЕНЦОВ, д-р техн. наук, проф., зав. каф., Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу;
Л. І. ФЕШАНИЧ, аспірант, Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу

ІНФОРМАЦІЙНА ТЕХНОЛОГІЯ ПІДВИЩЕННЯ ШВИДКОДІЇ АВТОМАТИЧНОГО ЗАХИСТУ КОМПРЕСОРА ВІД ПОМПАЖУ НА ОСНОВІ ЗЛИТТЯ ДАНИХ (DATA FUSION)

Обґрунтовано доцільність застосування новітніх методів злиття даних для вирішення науково-практичної проблеми автоматичного захисту компресора від помпажу, як явища, яке приводить до втрати працездатності газоперекачувального агрегату і має складний нелінійний характер. Доведено, що застосування інформаційної технології багатопараметричного злиття даних покращує продуктивність системи оцінювання поточних значень в декількох напрямках таких як швидкодія, точність, надійність і робастність.

Ключові слова: автоматичний захист, швидкодія, явище помпажу, компресор, кластер ний аналіз, злиття даних.

© Г. Н. СЕМЕНЦОВ, Л. І. ФЕШАНИЧ, 2015

Вступ. Значну частину відмов обладнання дотискувальних компресорних станцій (ДКС) підземних сховищ газу (ПСГ) складають аварійні зупинки, спричинені безпосередньо явищем помпажу. З огляду на це актуалізуються проблеми підвищення ефективності систем автоматичного захисту компресорів від помпажу.

Помпаж є одним з найнебезпечніших режимів роботи нагнітача. При виникненні помпажу нагнітач та двигун можуть отримати пошкодження несумісні з їх подальшою експлуатацією, а їх відновлення або ремонт потребують великих грошових витрат. Для усунення помпажних явищ в роботі компресорної станції експлуатаційний персонал змушений застосовувати режими, при який здійснюється рециркуляція газу як в контурі нагнітача, так і в станційних мережах. При цьому режим рециркуляції вибирається експериментально - практичним шляхом "на вгад", що призводить до підвищення об'ємів рециркуляції та перевитрат паливного газу.

Протягом останніх десятиліть широкого практичного використання набули дві концепції контролю за передпомпажним станом газоперекачувальних агрегатів (ГПА), що основані на визначенні витрато-напірних характеристик ГПА і на виявленні коливань в проточній частині нагнітача, які характерні для передпомпажних явищ.

Водночас недостатня швидкодія систем автоматичного захисту компресорів від помпажу вимагає системного розв'язання проблеми її збільшення. Саме цей факт визначає необхідність ґрунтовного дослідження технології Data Fusion як одного із методів підвищення швидкодії систем автоматичного захисту компресорів від помпажу.

Аналіз останніх досліджень і публікації. Базисні концепції захисту компресорів від помпажу були сформовані в наукових працях В. В. Казакевича [1], Р. А. Ізмайлова, К. П. Селезньова [2], В. П. Герасименко, М. В. Бойко, А. А. Гарагуля, Н. Б. Налесного [3], Т. Е. Крутікова [4] та ін. У подальшому окреслена проблематика розвивалась у роботах: Ю. Д. Акульшина, А. В. Александрова, С. Б. Ефремова, Т. Е. Крутікова, Ш. А. Юсіпова [5], Д. В. Кісельова [6], А. А. Іноземцева, Ю. С. Савенкова, А. Н. Саженкова, Ю. А. Трубнікова [7] та ін.

Вагомий внесок у розвиток цього наукового напрямку дослідження зробили вітчизняні вчені: П. Г. Дудко, В. В. Колодяжний, С. С. Сорокін, М. В. Хохряков, К. В. Дістрянов, В. О. Котляров [9], І. М. Бандура, О. В. Колесніков, О. А. Крайнюк [8], В. Г. Соляник, П. Ф. Слесар, О. П. Чепурний [10], М. В. Беккер, С. Г. Гіренко, Р. Я. Шимко, М. О. Петеш, Ю. Є. Бляут [14].

Серед іноземних авторів, які досліджують питання підвищення ефективності діагностування механічних систем на основі технології злиття даних (Data Fusion) варто виділити: I. B. Bloch [9], I. B. Gao, C. I. Harris [10], K. M. Reichard, M. V. Dyke, K Maynard [11], W. F. Wang [12], R. I. Stanley, P. D. Gader, K. C. Ho [13].

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

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

Основні результати дослідження способу захисту компресора від помпажу. Розглядається спосіб захисту компресора від помпажу, що здійснюється в робочому режимі компресора. При цьому вимірюють параметри, які 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 компресорних станціях підземних сховищ газу (ПСГ) явища, при який відбуваються пульсації потоку газу, що призводять до входження робочої точки нагнітача в нестаціонарний режим роботи, викликають збільшення вібрації 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 аналізу і встановлення зв'язків між розвитком помпажних явищ в нагнітачі, та ступеню їх впливу на характер зміни технологічних параметрів, щоб забезпечити підтримання робочої точки характеристики нагнітача поблизу помпажної зони [15].

Режим роботи нагнітача природного газу постійно змінюється впродовж експлуатації, що викликано зміною споживання газу, складу газу, умов навколишнього середовища, а також зміною технічного стану ГПА. Ці зміни впливають на режим роботи нагнітача і можуть привести його робочу точку на характеристиці в нестійку зону. Крім цього, ці зміни можуть вивести з рівноваги систему "нагнітач - мережа", що призведе до аварії. Одними з найнебезпечніших порушень рівноваги є явища, пов'язані з помпажем. Для цих явищ, в першу чергу, характерні зміни параметрів потоку газу на лопатях робочого колеса нагнітача. Із збільшенням опору мережі робоча точка нагнітача пересувається по характеристиці нагнітача вліво до межі помпажу. В цьому випадку робочому колесу не стає енергії для проштовхування газу в трубопровід нагнітача. Кількість газу, що передається, буде зменшуватись, на окремих лопатях робочого колеса почнеться зрив потоку газу, що призведе до появи в цьому потоці пульсації газу, які відповідають передпомпажним коливанням. Параметри передпомпажних коливань співпадають з параметрами коливань газу в стаціонарному режимі роботи нагнітача, тому їх важко виділити, і для цього необхідне спецобладнання. Тривалість передпомпажного режиму вираховується десятками хвилин, а перехід в зону помпажу відбувається за долі секунд.

При збільшенні кількості зривних зон потоку ними охоплюється більша кількість лопатів, які перестають працювати. Ці зривні зони виходять за межі робочого колеса та досягають дифузора і конфузора нагнітача. При цьому задіяні об'єми газу як і в області робочого колеса, так і в самому нагнітачі.

Коливання в потоці газу досягають 50% і мають гармонійних характер. Цей режим носить назву "м'який" помпаж. Розвиток і збільшення зривних зон призводить до охоплення близьких областей обв'язки нагнітача. При цьому частота коливань збільшується, а потужність зростає. Загроза "м'якого" помпажу полягає в тому, що його важко виявити.

В режим "жорсткого" помпажу нагнітач входить у тому випадку, коли

хвильовий процес потоку газу охоплює не тільки нагнітач і його контур, але й магістраль зі сторони всмоктування або нагнітання. Цей режим характеризується великими об'ємами перекачуваного газу, що обумовлює різке збільшення потужності коливань, яке скоріше призводить до аварійних ситуацій.

В основу запропонованого способу захисту [15] покладено задачу визначення моменту виникнення та ступінь розвитку помпажних явищ в нагнітачі компресорного агрегату з газотурбінним приводом шляхом алгоритмічного аналізу та порівняння причинно-наслідкових зв'язків між процесом розвитку помпажних явищ в 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, що дозволить своєчасно сформувати відповідну керуючу 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.

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

- перепаду тиску на конфузорі 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 в програмний модуль контролера, який 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 параметру, яке використовується алгоритмом для обрахування нового середнього значення кожного параметра при поступленні кожного чергового по такту. Після цього визначають коефіцієнт по параметру як співвідношення усередненого значення певного параметра за таблицею стеку до поточного значення контрольованого параметра від давача,перевищення якого над наперед відомим коефіцієнтом по певному параметру класифікується алгоритмом як ознака наявності помпажних коливань по параметру, і заносять в оперативну таблицю запам'ятовування, де при виникненні не менше 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 системи автоматичного керування (САК).

На підставі експериментальних досліджень було виявлено, що з понад усіх технологічних параметрів, які 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 їх 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 перекачки газу режимі. При зміні технологічних параметрів САК повертає ГПА в заданий стан, при якому робоча точка характеристики нагнітача підтримується поблизу помпажної зони.

Для постійного коригування стану ГПА служить розроблене авторами програмне забезпечення, яке реалізується програмним модулем контролера, згідно з яким оцінюється параметри ГПА за результатами спостережень вхідних сигналів від давачів, миттєво порівнюються з попереднім обрахованим середнім значенням кожного параметра, яке вираховується алгоритмом для обрахування нового середнього значення при надходженні наступного по такту за яким визначається коефіцієнт параметра, перевищення якого над наперед заданим класифікується як ознака наявності передпомпажних коливань, де при виникненні не менше чотирьох ознак наявності помпажних відхилень певного параметра і не менше ніж за чотирма параметрами формується сигнал, який передається до керуючого пристрою. Таким чином досягається максимальна швидкодія система захисту ГПА від помпажу.

При виникненні відхилень в кількості меншій ніж по чотирьох аналізованих параметрах, керуюча дія алгоритмом не формується, а розглядається, як випадкові відхилення вхідного сигналу від норми.

Кількість у чотири мітки, при яких системою формується 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 не спрацювання давачів або каналів вимірювання, що призводить до хибних висновків про стан ГПА.

Отже, цей спосіб захисту компресора від помпажу оснований на використанні надлишкових виміряних сигналів. Використання надлишкових вимірювань приводить до того, що у будь-який момент часу з’являється відхилення виміряних 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 виміряних сигналів, наприклад, внаслідок помпажу;

- як виміряні сигнали розподіляються відповідно до існуючих класів або груп майже рівних виміряних сигналів.

Для вирішення вказаних проблем, необхідно створити метод, який може керувати усією доступною інформацією у вигляді виміряних сигналів швидко і одночасно. Цей метод повинен ідентифікувати істотне відхилення сигналів і об'єднувати вимірювальні сигнали з майже рівними значеннями.

Ці вимоги можуть бути виконані за допомогою кластерного аналізу, тобто методу, що ділить досліджувану множину n об'єктів $X = \{x_1, x_2, \ldots, x_N\}$, кожен з яких характеризується m ознаками, на певні групи таким чином, що члени групи завжди більш пов'язані, ніж члени різних груп. Структура множини, яка кластерезується, характеризується нечіткістю груп об'єктів $A^1, A^2, \ldots, A^\upsilon, \upsilon \in \{1,2,\ldots,n\}$.

Як представлено на рис. 1, кластерний аналіз поділяється на чотири кроки [16]. Запис і підготовка даних до класифікації формує перший крок. У нашому випадку цей етап обмежений кількістю виміряних сигналів на ГПА, що характеризують явище помпажу.

Наступний крок – виявлення кластерної тенденції – є найбільш важливим, оскільки треба визначити чи досліджувані дані показують внутрішню структуризацію, чи вони розприділяються лише явно випадково, тобто необхідно ідентифікувати істотні відмінності між виміряними значеннями.

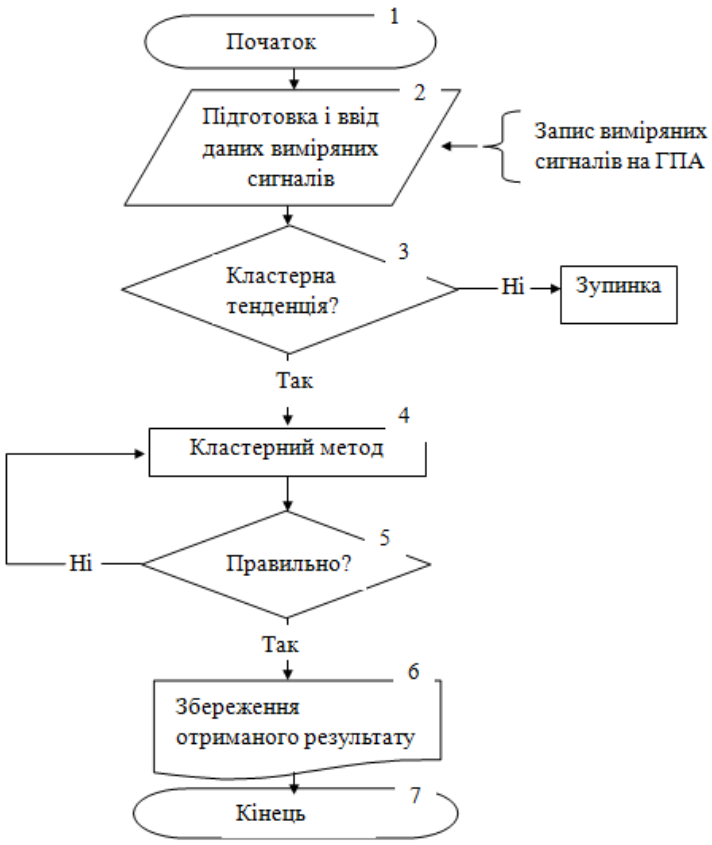

Рис. 1 – Блок-схема алгоритму кластерного аналізу

На третьому етапі переходимо до кластерного алгоритму. Відзначимо, що існують багато варіантів алгоритмів на основі прикладних методів [17,18]. Проте аналізування літературних джерел і результатів експериментальних досліджень показали, що в нашому випадку достатньо хороші результати дають наступні три методи кластерного аналізу:

- метод "одиничного зв'язку або мінімальної локальної відстані",
- алгоритм нечітких с-середніх (HCC),
- метод перехідного зами-кання подібнісних відношень.

На останньому кроці досліджується кластерна адекватність, тобто оцінюється число кластерів, які відповідають природному групуванню досліджуваних даних.

Оскільки досліджувані сигнали пошкоджені шумами, то для гарантування безперервності результатів класифікації шум зменшується через обчислення середнього значення ковзання. Цей метод був застосований через його помилко стійкість і легку реалізацію.

На етапі виявлення кластерної тенденції використали максимум різниці між парами

$$A_{\max} = \max_{i \neq j} \left\| x_i - x_j \right\| (1 \le i \le j \le N) \quad (1)$$

в даний момент часу.

Якщо $\Delta_{\max}$ перевищує заздалегідь встановлений рівень, то поділ виміряних значень проводиться в різних класах.

Щоб отримати оптимальну кількість класів, використали метод серединного розбиття [17]:

$$T = \frac{\sum_{i=1}^{N} \sum_{k=1}^{C} u_{ik}^{m} \left\| v_i - v_k \right\|^2}{C \cdot \min_{k \neq l} \left\| v_i - v_k \right\|^2}, \quad (2)$$

за допомогою якого u_{ik} визначає належність і-ї точки k-му кластеру. Кластер безпосередньо описує його прототип v_k. Крім цього, міру нечіткості визначатиме показник степеня m>1.

Відзначимо, що хоча параметр T спочатку розроблявся для методу нечітких с-середніх, виявилося, що він може бути використаний для оцінювання невизначеності ймовірнісного розбиття.

Обчислювач відображає так зване кластерне відхилення, яке є мірою компактності нечіткого розбиття. Якщо це значення мале, то класи компактніші оскільки вираз $\min \left\| v_i - v_k \right\|^2$ описує відстань між найближчими прототипами, тому він характеризує міру відокремлення нечітких розділень. Для добре відокремлених розділень цей вираз має велике значення.

Результуюча кластерна конфігурація тобто кортеж

Pompage <$dP_{конф}$, $N_{ст}$, Gg_{ZON}, Gv_{ZON}, Gv_{PON}, GgP_{ON}, G_{szcuvN}, K_{pompag}>,

де $dP_{конф}$ – перепад тиску газу на конфузорі нагнітача, $N_{ст}$ – частота обертання силової турбіни газотурбінного приводу і відповідно нагнітача, Gg_{ZON} – горизонтальне вібропереміщення задньої опори нагнітача, Gv_{ZON} – вертикальне вібропереміщення задньої опори нагнітача, Gv_{PON} – горизонтальне вібропереміщення передньої опори нагнітача, GgP_{ON} –вертикальне вібропереміщення передньої опори нагнітача, G_{szcuvN} – осьовий зсув нагнітача, може служити вхідною інформацією для системи діагностування помпажного стану компресора. Її завдання – вирішити чи відхилення викликані порушенням процесу (помпажем), чи дефектом в одному або більше каналах вимірювальної системи. Результатом цього діагнозу має бути: визначення вигляду пошкодження (помпажу), захист від помпажу, ідентифікація пошкодженого каналу вимірювальної системи.

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. Найбільш розповсюдженим методом статистичного синтезу спостерігачів є фільтр Калмана [19]. Проте неточності завдання математичної моделі системи, збурень і завад спричиняють розбіжності оцінки стану об'єкта керування, породжуваної фільтром Калмана. Від вказаного недоліку вільні такі спостерігачі класів станів динамічних систем як класифікатори, при синтезі яких математичну модель динамічної системи знати необов'язково. Згідно з таким підходом апріорі повинні бути відомі функціональний вид і всі параметри розподілу спостережуваного випадкового процесу. Тоді можливий синтез оптимальних класифікаторів.

Експериментальні дослідження, що були проведені на ГПА № 9 ДКС ПСГ "Більче-Волиця", дозволили нам вирішити це завдання [20]. Було встановлено статистичні характеристики усіх параметрів, що входять в кортеж Pompage <$dP_{конф}$, $N_{ст}$, Gg_{ZON}, Gv_{ZON}, Gv_{PON}, GgP_{ON}, G_{szcuvN}, K_{pompag}>, а також їх закони розподілу. З'ясувалося, що більшість сигналів, крім ступеня підвищення тиску газу, підпорядковуються логнормальному закону розподілу.

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 технологічних процес компримування природного газу є багатомірним і залежить від великої кількості взаємозв'язаних вхідних величин, то структуру моделі "MI-MO" ГПА як об'єкта антипомпажного регулювання і захисту розглядали у відповідності з поставленими задачами автоматизації (рис. 2).

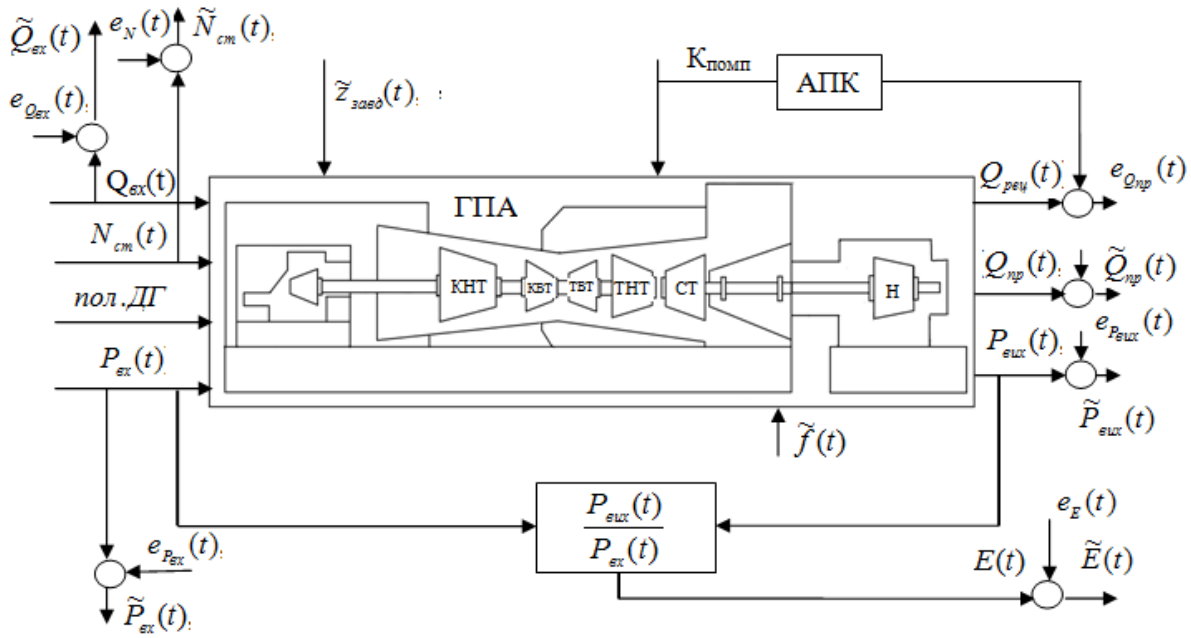

Рис. 2 – Структурна схема ГПА як об'єкта автоматичного антипомпажного регулювання: $N_{ст}$ – частота обертання силової турбіни; пол.ДГ – положення дозатора газу, $P_{вх}$ – тиск газу на вході в нагнітач; $Q_{пр}$ – продуктивність нагнітача; $Q_{вх}$ – об'єм газу з входу (ПСГ або ГПА I ступеня); $z_{завд}$ – задана оператором частота обертання ротора нагнітача; E – ступінь підвищення тиску, $E = \frac{P_{вих}}{P_{вх}}$; АПК

– антипомпажний клапан; $K_{помп}$ – коефіцієнт помпажу; $Q_{рец}$ – витрата рециркуляції; *f* – вектор, який характеризує взаємодію об'єкта з навколишнім середовищем

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 $Q_{вх}(t)$.

$$\overline{y^T}(t) = (N_{ст}(t), пол.ДГ, P_{вх}(t)). \tag{3}$$

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

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

$$\overline{x^T}(t) = (Q_{пр}(t), P_{вих}(t), E(t), Q_{рец}(t)). \tag{4}$$

Кожен із вихідних чинників є функцією керувальних дій y(t) та зовнішніх впливів z(t), *f*(t):

$$\overline{x_j}(t) = \varphi_j(\overline{y}(t), \overline{z}(t), \overline{f}(t)), \quad j = 1,2,\ldots,n, \tag{5}$$

де n – кількість вихідних чинників.

На рис. 2 показано, що внаслідок дії на ГПА таких збурень як хімічний склад реального транспортованого газу, технічний стан, температура навколишнього середовища, атмосферний тиск та інших, вхідні і вихідні змінні ГПА вимірюються з певними похибками, які можна трактувати як адитивні шуми e(t).

Алгоритм функціонування об'єкта керування наступний:

$$\begin{aligned} \tilde{Q}_{пр}(t) &= A_1\{\tilde{Q}_{вх}(t), \tilde{N}_{ст}(t), \tilde{P}_{вх}(t), \tilde{z}_{завд}(t), \tilde{f}(t)\}, \\ \tilde{P}_{вих}(t) &= A_2\{\tilde{Q}_{вх}(t), \tilde{N}_{ст}(t), \tilde{P}_{вх}(t), \tilde{z}_{завд}(t), \tilde{f}(t)\}, \\ \tilde{E}(t) &= A_3\{\tilde{Q}_{вх}(t), \tilde{N}_{ст}(t), \tilde{P}_{вх}(t), \tilde{z}_{завд}(t), \tilde{f}(t)\}, \end{aligned} \tag{6}$$

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 в кортеж Pompage <$dP_{конф}$, $N_{ст}$, Gg_{ZON}, Gv_{ZON}, Gv_{PON}, GgP_{ON}, G_{szcuvN}, K_{pompag}>.

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

$$Q(y(t)) = \int_0^{t_k} f_0(x(y,t), y(t))dt = t_k \to \min_{y(t)\in Y}, \tag{7}$$

де підінтегральна функція $f_0 \equiv 1$.

При цьому враховані обмеження на змінні $\overline{x}(t), \overline{z_{зд}}(t), \overline{y}(t)$, які задані у вигляді умов належності векторів $\overline{x}(t), \overline{z_{зд}}(t)$ та $\overline{y}(t)$ до деяких замкнутих множин

$$\overline{x}(t) \in X; \quad \overline{z_{зд}}(t) = Z_{зд}; \quad \overline{y}(t) \in Y, \tag{8}$$

де X, $Z_{зд}$, Y – замкнені множини, задані відповідно в n-, l-, m- мірних просторах. Обмеження на компоненти векторів $\overline{x}(t), \overline{z_{зд}}(t), \overline{y}(t)$ покладені незалежно один від

одного: $0 \le x_n \le x_{n\max}$; $0 \le z^l_{зд} \le z^l_{зд\max}$; $0 \le y_m \le y_{m\max}$, де $x_{n\max}$, $z^l_{зд\max}$, $y_{m\max}$ - максимально допустимі значення компонентів.

Отже, шуканий мінімальний час t_k є функціоналом (7), що залежить від вибраних керувальних дій y(t), $0 \le t \le t_k$, вимірювальних за Лебегом.

Завдання автоматичного захисту ГПА від помпажу, які вимагають певної оцінки 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 використовується як синоніми, однак термін злиття даних більш коректно застосовувати до неопрацьованих даних, отриманих безпосередньо від давачів, а термін злиття інформації використовується для вже оброблених даних. Інші терміни, що пов'язані із злиттям даних та зазвичай з'являються в літературі містять: синтез рішень, поєднання даних, агрегування даних, багатопараметричне злиття даних.

DF - методи широко використовуються в умовах створення систем з великою кількістю інформації від давачів, вони базуються на об'єднані даних з метою отримання більш високої швидкодії, надійності та низької ймовірності виникнення помилки діагностування.

Джерела інформації, що застосовуються при злитті даних поділяють на [21]:

- доповнюючі: коли вхідні дані являють собою різні характеристики об’єкта керування і тому злиття забезпечить більш повну інформацію;
- надмірні: коли два або більше джерела даних надають схожу інформацію, а злиття відбувається з метою збільшення її надійності;
- кооперативні: коли 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 [22]:

- дані - дані (DAI-DAO): цей тип є основним DF - методом, що розглядається в 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 давачів;
- 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 в навколишньому середовищі;
- функція - функція (FEI-FEO): на цьому рівні як входами так і виходами процесу злиття даних є функції. Таким чином, процес злиття даних усуває ряд функцій з метою 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, які потрапляють в цю категорію класифікації, здобувають рішення, базуючись на даних від давачів;
- 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 в цілях діагностики технічного стану газоперекачувальних агрегатів, попередньо опрацьовують. Типовий поток

даних (Data Flow) для прогнозування та діагностики технічного стану газоперекачувальних агрегатів складається з наступних етапів [23]:

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

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 [24, 25]. Правильна попередня обробка даних може покращити продуктивність системи діагностики або прогнозування технічного стану газоперекачувальних агрегатів.

Аналіз довів, що найбільш поширеними методами злиття даних є злиття ваг, метод Демпстера-Шафера, ШНМ, фільтр Калмана та нечіткий інтеграл.

Метод злиття ваг можна представити формулою [26]:

$$y(j) = \sum_{i=1}^{n} w_{ij} x(i, j), \tag{9}$$

де *y(j)* - об'єднаний результат для об'єкта *j*; *i* - число джерел інформації, $\forall j = 1:n$;

j - число об'єктів, $\forall i = 1:m$; *x(i,j)* – результат спостереження з джерела інформації *i* об'єкта *j*, w_{ij} - вага джерела інформації *i* для об'єкта *j*:

$$\sum_{i=1}^{n} w_i = 1. \tag{9}$$

Одним з 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. В результаті точність злиття даних може бути знижена.

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

$$[Belief(A)_i, Plausibility(A)_i], \tag{10}$$

де $Belief(A)_i$ - функція довіри, що являє собою міру достовірності даних давача *i* про несправність "А" (гіпотеза А); $Plausibility(A)_i$ - функція правдоподібності, що означає величину максимального значення довіри до гіпотези А.

Нижньою межею довірчого інтервалу є рівень довіри:

$$Belief_i(A) = \sum_{B \subseteq A} m_i(B), \tag{11}$$

де $m_i(B)$ – довіра по всім підмножинам А; $B \subseteq A$ - будь-яка непорожня множина, що належить множині А.

Верхня межа довірчого інтервалу це правдоподібність, яка враховує всі зауваження, які не виключають помилку "А". Правдоподібність описується так:

$$Plausibility(A)_i = 1 - Belief_i(\overline{A}) = \sum_{B \cap A \neq \phi} m_i(B), \quad (12)$$

де $\overline{A}$ - доповнення до гіпотези, міра сумніву до гіпотези А; $B \cap A \neq \phi$ - усі непорожні підмножини, що перетинають множину А.

Для кожного можливого випадку, теорія очевидності Демпстера-Шафера пропонує таке правило для об'єднання спостережень давачів:

$$m(A) = \frac{\sum_{A_1 \cap A_k = A} m_1(A_1) \cdots m_k(A_k)}{\sum_{A_1 \cap A_k \neq \phi} m_1(A_1) \cdots m_k(A_k)}, \quad (13)$$

де $m(A)$ – міра довіри до гіпотези А про несправність А з давачів 1,2,…k; $A_1 \cap A_k = A$ - множина А, що складається з усіх елементів множини A_1, які одночасно належать і множині A_k., $A_1 \cap A_k \neq \phi$ - усі непорожні підмножини, що перетинають множину А.

Недоліками методу Демпстера-Шафера є складність і важкість визначення функції маси ймовірності.

ШНМ є ще одним методом злиття даних, що часто використовується, завдяки їх можливості розпізнавання образів і здатності розпізнавати нечіткі і неточні сигнали.

Основною одиницею обробки сигналів в ШНМ є нейрон, що продукує вихід, формуючи суми ваг входів. Вихід нейрона є нелінійною функцією суми ваг. Характеристика нейрона може бути описана як [26]

$$y = f\left[\sum_{i=1}^{m} w_i x_i\right], \quad (14)$$

де у - виходи; *f*- нелінійна функція перетворення чи функція активації; w_i - ваги, $i=1,2,\ldots,m$; x_i- входи, $i=1,2,\ldots,m$.

З усіх ШНМ, найчастіше використовується багатошарова ШНМ прямого поширення, яка також відома як багатошаровий персептрон.

Фільтр Калмана може бути представлений таким виразом [26]:

$$z_k = H_k x_k + v_k, \quad (15)$$

де z_k - вектор вимірів розмірністю m; H_k - матриця вимірів $m \times n$, що характеризує зв'язок вектора стану з вектором вимірів; x_k - вектор стану розмірністю n; v_k - білий гаусівський шум вимірів з нульовим математичним сподіванням і коваріаційною матрицею R_k.

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.

Нечіткий інтеграл може бути представлений виразом [26]

$$FI = \int h \circ \mu, \quad (16)$$

де FI – нечіткий інтеграл; *h*- вимірна функція (функція належності); $\circ$ - композиція, найчастіше використовується максмінна композиція; μ - нечітка міра.

Недоліком нечіткого інтегралу є складність визначення нечіткої міри.

Нами використано інтерактивну процедуру синтезу системи антипомпажного захисту, яка забезпечує потрібну швидкодію, точність і зручність її реалізації в умовах експлуатації САК ГПА ДКС ПСГ. Запропоновано загальну структуру системи (рис. 3), яка реалізує розроблений DF-метод і програмне забезпечення системи антипомпажного захисту у варіанті конкретного прикладу.

Вона містить групу інтелектуальних HART-давачів, HART-MUX-мультиплексом Метран – 670, персональний комп'ютер HART-Master, послідовий порт комп'ютера COM, джерело живлення постійного струму, антипомпажний клапан. 16-ти канальний HART - мультиплексом Метран – 670 призначений для зв'язку інтелектуальних HART-давачів з комп'ютером або АСКТП. Як давачі можуть бути використані давачі тиску Метран-150, Метран100, Метран-49, Rosemount 3051, Rosemount 3051Sперетворювачі витрати Метран-300 ПР, Метран-305 ПР та інші. HART – мультиплексор не є засобом вимірювання і не вносить додаткової похибки в аналоговий вимірювальний сигнал. Він забезпечує перетворення інформаційного сигналу HART в цифровий сигнал з інтерфейсом RS 485або RS 232, при цьому аналоговий сигнал 420 мА струмового кола може використовуватись системою реєстрації та керування.

Рис. 3 – Структурна схема системи антипомпажного захисту ГПА

Висновки. Застосування сучасних інформаційних технологій, основаних 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 в цілому. Застосування методу багато параметричного злиття даних може покращити продуктивність системи оцінювання поточних значень в декількох напрямках, таких як швидкодія, точність, надійність і робастність. Перенесення цієї технології для виявлення явища помпажу у ВН ГПА ДКС ПСГ, безумовно, підвищить можливості системи антипомпажного захисту і регулювання.

Список літератури: 1. *Казакевич, В. В.* Автоколебания (помпаж) в компрессорах [Текст] / *В. В. Казакевич.* – М.: Машиностроение, 1974. – 264 с. **2.** *Измайлов, Р. А.* Нестационарные процессы в

центробежных компрессорах [Текст] / *Р. А. Измайлов, К. П. Селезньов* // Химическое и нефтяное машиностроение. – 1995. – № 11. – С. 20–24. **3.** *Герасименко, В.П.* Вращающийся срыв в турбинном режиме работы компрессора [Текст] / *В. П. Герасименко, М. В. Бойко, А. А. Гарагуль, Н. Б. Налесный* // Энергетические и теплотехнические процессы и оборудование. – 2005. – № 6. – С. 65–71. **4.** *Крутиков, Т. Е.* Система диагностирования предпомпажного остояния центробежного компресора [Текст]: автореф. дис.... канд. техн. наук: 05.04.06 / *Т. Е. Крутиков* // Санкт-Петербургский государственный политехнический университет. – Санкт-Петербург, 2003. – 18 с. **5.** *Измайлов, Р. А.* Разработка системы диагностики помпажа центробежного компрессора на основе анализа физики нестационарних процессов / *Р. А. Измайнов, А. В. Александров, С. Б. Ефремов, Т. Е. Крутиков, Ш. А. Юсипов* // XII Международная научно-техническая коеференция по компрессорной технике: тезисы докл. – 2001. – С. 121–123. **6.** Патент 2263234 С1 Российская Федерация. Способ формирования сигнала помпажа турбокомпрессора [Текст] / *Киселев Д. В.* – №2004/36854/06; заявл. 16.12.2004; опубл. 27.10.2005, Бюл. № 10. – 4 с. **7.** Патент А. с. 2187711 Российская Федерация. Способ диагностики помпажа компрессора газотурбынного двигателя [Текст] / *Иноземцев А. А., Савенков Ю. С., Саженков А. Н., Трубников Ю.А.* – №2000129301/06; заявл. 22.11.2000; опубл. 20.08.2002. – Бюл. № 1. – 4 с. **8.** Патент 2640 Україна. Пристрій для захисту від помпажу компресора [Текст] / *Бандура І. М., Колесніков О. В., Крайнюк О. А.* – №2003054915; заявл. 29.05.2003; опубл. 15.07.2004. – Бюл. № 7. – 2 с. **9.** Патент 47153 Україна. Спосіб захисту компресора газоперекачувального агрегату від помпажу [Текст] / *Дудко П. Г., Колодяжний В. В., Сорокін О. О., Хохряков М. В., Дістрянов С. В., Котляров В. О.*– №2001085632; заявл. 07.08.2001; опубл. 17.06.2003. – Бюл. № 6. – 8 с. **10.** Патент 5427 Україна. Спосіб захисту компресора газоперекачувального агрегату від помпажу [Текст] / *Соляник В. Г., Колодяжний В. В., Слесар П. Ф., Чепурний О. П., Хохряков М. В., Дістрянов С. В., Даценко А. І.* – №00042504084; заявл. 28.05.2004; опубл. 15.03.2005, Бюл. № 3.–8 с. **11.** *Bloch, I.* Information combination operators for data fusion: A comparative review with classification [Text] / *I. Bloch* // IEEE Transactions Systems Man Cybernet. – 1996. – № 26 (1). – P. 52–67. **12.** *Gao, J.* Some Remarks on Kalman Filters for the Multisensor Fusion [Text] / *J. Gao, C. J. Harris* // Information Fusion Journal. – 2002. – V. 3. – P. 191–201. **13.** *Sun, Z. Z.* Theory and technology of intelligent control [Text] / *Z. Sun, Z. Zhang, Z. Deng*. – Qinghua University Press. – 1997. – 373 p. **14.** *Stanley, R. J.* Feature and decision level sensor fusion of electromagnetic induction and ground penetrating radar sensors for landmine detection with hand-held units [Text] / *R. J. Stanley, P. Gader, D. Ho* // Information Fusion. – 2002. – V. 3. – P. 215–223. **15** Патент 89302 Україна. Спосіб захисту компресора від помпажу [Текст] / *Беккер М. В., Шимко Р. Я., Семенцов Г. Н., Бляут Ю. Є., Гіренко С. Г., Петеш М. О., Сукач О. В., Репета А. Ф.* – №а200807810; заяв. 09.06.2008; опубл. 11.01.2010, Бюл. №1. – 6 с. **16.** *Bezdek, J. C.* On cluster validity for the fuzzy c-means model [Text] / *J. C. Bezdek, R. P. Nikhil* // IEEE Transactions on Fuzzy Systems. – 1995. – № 3(3). – P. 370–379. **17.** *Beni, G. A.* A validity measure for fuzzy clustering [Text] / *G. A. Beni, X. L. Xie* // IEEE Transactions Pattern Analisis and Machine Intelligence. – 1991. – № 13. – P. 841–847. **18.** *Полонський, О. Д.* Синтез класифікаторів станів об'єктів керування за умов невизначеності [Текст]: автореф. дис... д-ра тех. наук: 05.13.03 / *О. Д. Полонський* // Харківський нац. ун-т радіоелектроніки. – Х., 2007. – 35 с. **19.** *Давиденко, Л. І.* Експериментальна оцінка законів розподілу випадкових процесів у системі автоматичного керування газоперекачувальним агрегатом дотискувальної компресорної станції підземного сховища газу [Текст] / *Л. І. Давиденко* // Нафтогазова енергетика. – 2014. – № 1 (21). – С. 64–69. **20.** *Durrant-Whyte, H. F.* Sensor models and multisensor integration [Text] / *H. F. Durrant-Whyte* // International Journal of Robotics Research. – 1988. – V. 7. – P. 97–113. **21.** *Schaefer, C. G.* Sensor management in a sensor rich environment [Text] / *C. G. Schaefer, K. J. Hintz* // Proceedings of the SPIE International Symposium on Aerospace/Defense Sensing and Control. – 2000. – V. 4052. – P. 48–57. **22.** *Carney, E.* Monetary, logistical and technical benefits of a prognostic health management system [Text] / *E. Carney* // Proceedings of the 58th Meeting of the Society for Machinery Failure Prevention Technology. – 2004. – P. 63–77. **23.** *Gorodetski, V.* Multi–agent data fusion systems: design and implementation issues [Text] / *V. Gorodetski, O. Karsayev, V. Samoilov* // Proceedings of the 10th International Conference of Telecommunication Systems. – 2004. – P. 762–774. **24.** *Castanedo, F.* A Review of Data Fusion Techniques [Text] / *F. Castanedo* // The Scientific World Journal. – 2013. – V. 2. – 19 p. **25.** *Давиденко, Л.І.* Аналіз методів злиття даних в системах антипомпажного захисту та регулювання відцентрових нагнітачів газоперекачувальних агрегатів [Текст] / *Л. І. Давиденко* // Інформаційні технології в освіті

техніці та промисловості. – Івано-Франківськ. – 2013 – С. 17–19. **26.** *Byington, C. S.* Data fusion for development predictive diagnostic for electromechanical systems [Text] / *C. S. Byington, K. Garga* // Handbook of Sensor Fusion, CRC Press. – 2000. – P. 23–31.

Bibliography (transliterated): 1. *Kazakevich, V. V.* (1974). Autooscillation (surge) of the compressor. Machine manufacturing, 264. **2.** *Izmailov, R. A., Seleznev, K. P.* (1995). Non-stationary processes in the centrifugal compressors. Chemical and oil machine manufacturing, № 11, 20-24. **3.** *Gerasimenko, V. P., Boiko, M., Garagulya, A. A., Nalesny, N. B.* (2005). Rotating stall in the turbine operation of the compressor. Energy and heat engineering processes and equipment, № 6, 65-71. **4.** *Krutikov, T. E.* (2003). Diagnosic system of the state of the centrifugal compressor before the surge. Saint Petersburg State Polytechnical University, 18. **5.** *Izmailov, R. A., Alexandrov, A. V., Efremov, S. B., Krutikov, T. E., Yusipov, S. A.* (2001). Development of diagnostic of antisurge systems of the centrifugal compressor basis on the analysis of the physics of nonstationary processes. XII International Scientific conference of the compressor technology: Abstracts, 121-123. **6.** *Kiselev, D. V.* (2005). Patent 89302 RF, MPK: F04D 27/02. Method of formation of the turbo compressor surge signal. 2004/36854/06, 4. **7.** *Inozemtseva, A. A., Savenkov, Yu. S., Sazhenkov, A. N., Trubnikov, Yu. A.* (2002). Patent A. s. 2187711 RF, MPK: F04D 27/02. Method of diagnosis compressor surge of gas engine. 2000129301/06, 4. **8.** *Bandura, I. M., Kolesnikov, A., Kraynyuk, A. A.* (2004). Patent 2640 UA, MPK: F04D 27/02. The device for antisurge compressor protection. 2003054915, 2. **9.** *Dudko, P. G., Kolodyazhni, V. V., Sorokin, O. O., Hohriakov, M. V., Distryanov, S. V., Kotliarov, V. O.* (2003). Patent 47153 UA, MPK: F04D 27/02. A method for surge protecting of the compressor of gas pumping units. 2001085632, 8. **10.** *Solyanik, V. G., Kolodyazhni, V. V., Slesar, P. F., Chepurni, O. P, Hohriakova, M. V., Distryanov, S. V., Datsenko, A. I.* (2005). Patent 5427 UA, MPK: F04D 27/02. A method for surge protecting of the compressor of gas pumping units. 00042504084, 8. **11.** *Bloch, I.* (1996). Information combination operators for data fusion: A comparative review with classification. IEEE Transactions Systems Man Cybernet, 26 (1), 52-67. **12.** *Gao, J., Harris, J.* (2002). Some Remarks on Kalman Filters for the Multisensor Fusion. Information Fusion Journal, V. 3, 191-201. **13.** *Sun, Z. Z., Zhang, Z., Deng, Z.* (1997). Theory and technology of intelligent control. Qinghua University Press, 373 p. **14.** *Stanley, R. J., Gader, P., Ho, D.* (2002). Feature and decision level sensor fusion of electromagnetic induction and ground penetrating radar sensors for landmine detection with hand-held units, V. 3, 215-223. **15.** *Bekker, M. V., Shymko, R. Ya., Sementsov, G. N., Blyaut, Yu. Ye., Girenko, S. G., Petesh, M. O. Sukach, O. V., Repeta, A. F.* (2008). Patent 89302 UA, MPK: F04D 27/02. Method for compressor protection against surge. a200807810, 4. **16.** *Bezdek, J. C., Nikhil, R. P.* (1995). On cluster validity for the fuzzy c-means model. IEEE Transactions on Fuzzy Systems, 3, 370-379. **17.** *Beni, G. A., Xie, X. L.* (1991). A validity measure for fuzzy clustering. IEEE Transactions Pattern Analisis and Machine Intelligence, № 13, 841-847. **18.** *Polonsky, A. D.* (2007). Synthesis of classifiers of control objects' states under conditions of indefiniteness. Kharkov national university of radioelectronics, 35. **19.** *Davydenko, L. I.* (2014). Experimental estimation of probability distributions of random processes in the system of automatic control of compressor units of booster station of underground gas storage. Oil and gas energy, № 1 (21), 64-69. **20.** *Durrant-Whyte, H. F.* (1988). Sensor models and multisensor integration. International Journal of Robotics Research, V. 7, 97-113. **21.** *Schaefer, C. G., Hintz, K. J.* (2000). Sensor management in a sensor rich environment. Proceedings of the SPIE International Symposium on Aerospace/Defense Sensing and Control, V. 4052, 48-57. **22.** *Carney, E.* (2004). Monetary, logistical and technical benefits of a prognostic health management system. Proceedings of the 58th Meeting of the Society for Machinery Failure Prevention Technology, 63-77. **23.** *Gorodetski, V., Karsayev, O., Samoilov, V.* (2004). Multi–agent data fusion systems: design and implementation issues. Proceedings of the 10th International Conference of Telecommunication Systems, 762-774. **24.** *Castanedo, F.* (2013). A Review of Data Fusion Techniques. The Scientific World Journal, V. 2, 19. **25.** *Davydenko, L. I.* (2013). Analysis methods for data fusion for antisurge protection and control systems of centrifugal superchargers of gas compressor units. Information Technology in Education and Industry, 17-19. **26.** *Byington, C. S., Garga, K.* (2000). Data fusion for development predictive diagnostic for electromechanical systems, Handbook of Sensor Fusion, CRC Press, 23-31.

Надійшла (received) 21.02.2015