

УДК 681.5.015

## ПРОБЛЕМА ВІДМОВИ ДАВАЧІВ І ЇХ ПОМИЛКОВОГО СПРАЦЬОВУВАННЯ ПРИ ЕКСПЛУАТАЦІЇ АВТОМАТИЧНОЇ СИСТЕМИ АНТИПОМПАЖНОГО КЕРУВАННЯ

Л.І. Фешанич, Г.Н. Семенцов

Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу, м. Івано-Франківськ, вул. Карпатська 15, 76000

*Розглядається важлива науково-практична задача, яка полягає в удосконаленні системи антипомпажного керування відцентровим нагнітачем газоперекачувального агрегату з газотурбінним приводом дотискувальної компресорної станції підземного сховища газу шляхом розв'язання проблеми усунення відмов давачів і їх помилкового спрацювання при її експлуатації.*

*Розв'язання цієї проблеми пов'язане з необхідністю комплексного оброблення інформації, яка поступає одночасно від великої кількості давачів. Тому необхідно розглянути, методи, що зводяться до об'єднання кількох давачів первинної інформації в один комплексний давач за допомогою пристрою вибору, що забезпечує видачу результуючого сигналу в залежності від вихідних сигналів давачів.*

*Важливим завданням є вибір кількості давачів первинної інформації, що входять в комплексний давач з однакових давачів первинної інформації, при отриманні сигналу від яких має спрацювати система антипомпажного захисту і керування.*

*Ключові слова: автоматична система антипомпажного керування, комплексний давач, відмова*

*Рассматривается важная научно-практическая задача, которая заключается в совершенствовании системы антипомпажного управления центробежным нагнетателем газоперекачивающих агрегатов с газотурбинным приводом дожимной компрессорной станции подземного хранилища газа путем решения проблемы отказа датчиков и их ложного срабатывания при ее эксплуатации.*

*Решение этой проблемы связано с необходимостью комплексного обработки информации, поступающей одновременно от большого количества датчиков. Поэтому необходимо рассмотреть методы, которые сводятся к объединению нескольких датчиков первичной информации в один комплексный датчик с помощью устройства выбора, обеспечивает выдачу результирующего сигнала в зависимости от выходных сигналов датчиков.*

*Важной задачей является выбор количества датчиков первичной информации, входящих в комплексный датчик из одинаковых датчиков первичной информации, при получении сигнала от которых должен сработать система антипомпажной защиты и управления.*

*Ключевые слова: автоматическая система антипомпажного управления, комплексный датчик, отказ*

*The important scientific and practical task, which is to improve the anti-surge automatic system of centrifugal supercharger compressor units booster compressor stations of underground gas storage by the problem of failure of sensors and their nuisance tripping during its operation has been considered.*

*Solving of this problem is related to the need of complex information processing that goes on at the same time a large number of sensors. It is therefore necessary to consider methods to reduce the association of some primary information sensors in one sensor integrated with the device of choice, providing the issuance resulting signal based on the output signals of the sensors.*

*An important task is to choose the number of primary information sensors that are integrated in the sensor with the same primary sensor information when receiving the signal from which the system should work anti-surge protection.*

*Keywords: automatic anti-surge system, integrated sensor, malfunction*

### Вступ.

Відомо [1], що одним з найбільш оптимальних режимів роботи компресорної станції (КС) є режим, при якому забезпечується максимальне завантаження агрегатів, коли робочі точки витратно-напірних характеристик відцентрових нагнітачів (ВН) знаходяться поблизу межі помпажної зони.

Отже, найбільш енергетично вигідним режимом є режим з найвищим ККД газоперекачувального агрегату (ГПА) і який знаходиться практично в передпомпажній зоні. Разом з тим при такому режимі необхідно забезпечити стабільну роботу ВН і не дати робочій точці переміститися в зону помпажу. Таке завдання повинно вирішуватися за допомогою системи антипомпажного керування

та захисту, яка повинна забезпечити надійну роботу ВН поблизу межі помпажної зони [2].

Застосування таких систем, пов'язане з використанням давачів первинної інформації про явище помпажу та проблемою відмови давачів і їх помилкового спрацювання в процесі експлуатації. Одним із шляхів вирішення проблеми є використання методу, що зводиться до об'єднання кількох давачів первинної інформації в один комплексний давач за допомогою пристрою вибору, що забезпечує видачу результуючого сигналу в залежності від вихідних сигналів давачів.

#### Аналіз сучасних закордонних і вітчизняних досліджень і публікацій.

Аналізування літературних джерел [1÷4 та ін.] показує, що існує кілька методів визначення моменту входу робочої точки в зону помпажу. В загальному вигляді їх можна поділити на дві групи – першу, що визначається за витратно-напірними характеристиками ВН (так званий

“класичний” метод), та другу, що ґрунтується на виявленні коливаль у проточній частині ВН, що характерні для передпомпажних і помпажних явищ.

Перша група методів оснований на непрямих методах розрахунку визначення меж помпажу. Їхня сутність полягає в тому, що розраховується положення робочої точки ВН на основі паспортних витратно-напірних характеристик ВН з прив'язкою до паспортної лінії межі помпажу. Далі тим або іншим способом розраховують необхідний запас за приведеною витратою до межі помпажу та визначають лінію захисту від помпажу. Потім значення величин відлаштованої лінії вводять у пристрій захисту (регулювання) від помпажу, чим запобігають переходу робочої точки ВН в зону небезпечних режимів, не допускаючи тим самим виникнення помпажу [2]. Основними недоліками застосування “класичного” методу визначення меж помпажу в сучасних умовах в [2] визначено такі (рис. 1).

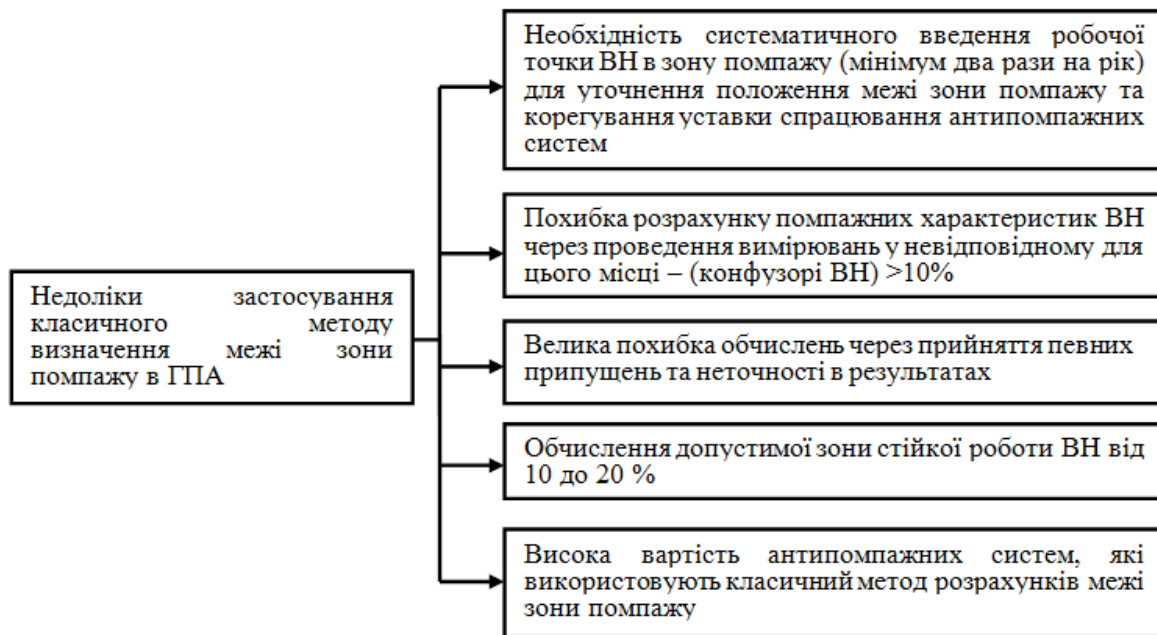


Рисунок 1 – Основні недоліки застосування “класичного” методу визначення межі зони помпажу в сучасних умовах

Друга група методів оснований на виявленні коливаль у проточній частині ВН. Їх називають прямими методами [2, 5, 6 та ін]. Суть цих методів полягає у вимірюванні пульсації перепаду тиску на конфузори та інших параметрів.

При аналізі коливаль газового потоку у ВН є можливість визначити дійсну межу зони помпажу і розширити роботу області ВН до межі передпомпажної зони [5].

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

Недоліками є також те [7], що, використовуючи тільки прямий метод, оперативний персонал КС, за умови роботи ГПА на значній відстані від помпажної зони, не може бачити поступового наближення до неї.

Окрім цього, недоліком є і те, що помпаж визначається лише за зміною одного параметра, що не забезпечує потрібну швидкодію і надійний захист від помпажу.

Невирішеною частиною проблеми є створення методу і системи антипомпажного захисту, яка б поєднувала переваги кожного з методів. Розв'язання цієї проблеми зв'язане з необхідністю комплексного оброблення інформації, яка поступає одночасно від великої кількості датчиків. Тому актуальною задачею є аналіз методу, що зводяться до об'єднання кількох датчиків первинної інформації в один комплексний датчик за допомогою пристрою вибору, що забезпечує видачу результуючого сигналу в залежності від вихідних сигналів датчиків.

### Основний матеріал.

Проблему відмови датчиків і їх помилкового спрацювання розглядатимемо на прикладі ГПА Ц-6,3 з газотурбінним приводом як об'єкта керування. Він складається з таких основних систем і механізмів [8]: ВН із системою

ущільнення, газотурбінного двигуна, системи маслозабезпечення, вхідного тракту з повітрязабірними камерами, повітроочищувачами та пристроєм антизледеніння; системи обігріву та системи вентиляції відсіків агрегату та маслобаків; систем електроживлення, пожежогасіння, виявлення загазованості, вимірювання вібрації двигуна, вібрації та осьового зсуву нагнітача; апаратури первинних перетворювачів, системи автоматичного керування (САК) ГПА, виконавчих механізмів, кранової обв'язки двигуна та ВН.

Антипомпажний захист ВН ГПА є підзадачею загальної проблеми оптимального керування КС, зокрема дотискувальної компресорної станції (ДКС) підземного сховища газу (ПСГ), які повинні забезпечувати високу надійність і продуктивність роботи, досягнення найбільшої ефективності функціонування єдиної системи газопостачання України.

Структуру запропонованої системи антипомпажного захисту ВН ГПА наведено на рис.2, яка є різновидом структури розробленій в [9,10].

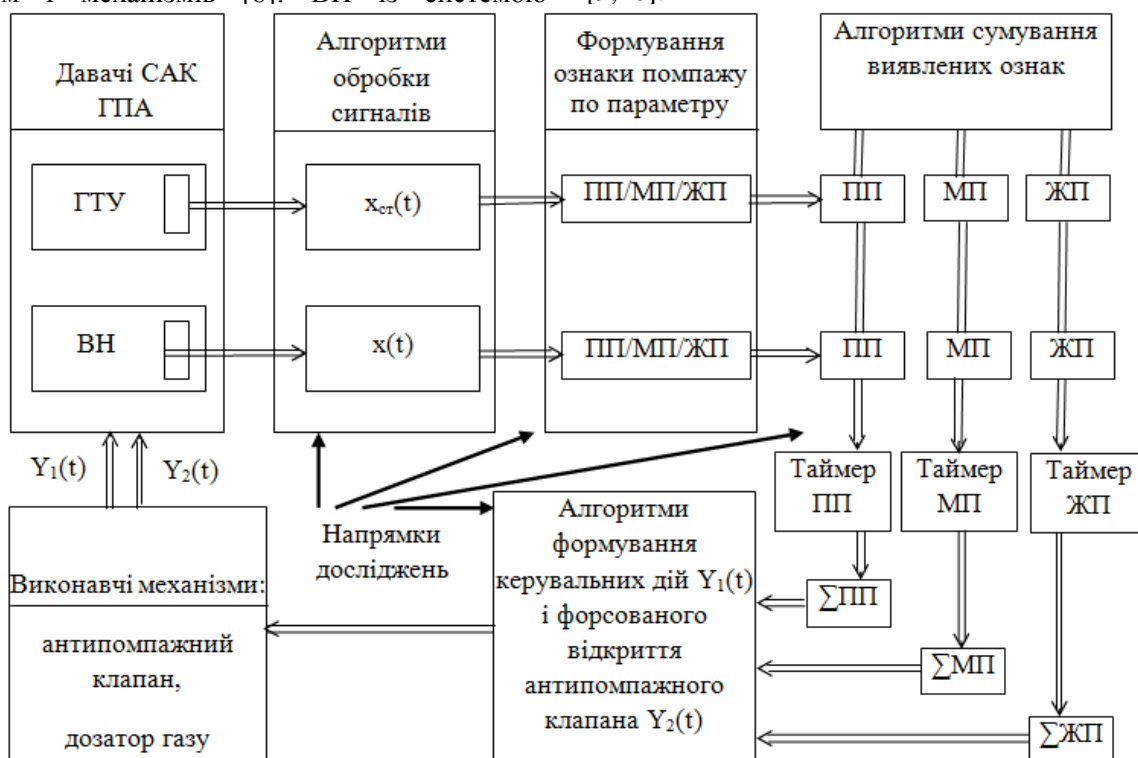


Рисунок 2 – Модель системи антипомпажного захисту ВН ГПА: ГТУ – газотурбінна установка, ПП – передпомпажний стан, МЖ – стан м'якого помпажу, ЖП – жорсткий помпаж,  $x_{ст}(t)$  – сигнал, отриманий від газотурбінної установки,  $x(t)$  – сигнали, отримані від відцентрового нагнітача,  $Y_1(t)$  – керувальні дії,  $Y_2(t)$  – сигнал форсованого відкриття антипомпажного клапана

Антипомпажне регулювання і захист передбачають збереження безпечної відстані між робочою точкою ВН і межею його помпажу

та оптимальним режимом роботи ВН ГПА. Захист здійснюється за допомогою зміни положення захисного антипомпажного клапана

на необхідну величину, а регулювання - корегуванням завдання регулятора швидкості обертання ВН.

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

Другий канал, канал антипомпажного захисту, є найбільш швидкодіючим і визначає момент входження ВН в помпаж на ранніх стадіях його зародження за рахунок виявлення обертального зриву, який передуює помпажу і видає сигнал  $У_2(t)$  на форсоване відкриття антипомпажного клапана для екстреного виводу ГПА із зони небезпечних режимів роботи.

Математичне забезпечення алгоритмів розпізнавання аварійних режимів ґрунтується на багатопараметричному груповому статистичному аналізі сигналів великої кількості давачів процесу компримування газу в реальному часі. При цьому кожні 10мс [9,10] повинні обчислюватися параметри, що характеризують ступінь нестационарності процесу, які відповідають алгоритмам розпізнавання помпажу.

До теперішнього часу залишається актуальною проблема антипомпажного захисту ГПА, який повинен забезпечувати ідентифікацію помпажу з формуванням сигналу “помпаж”, переривання виниклого помпажу шляхом формованого відкриття антипомпажного клапана (АПК) з подальшим переходом в режим регулювання, формування сигналу “Вимога аварійної зупинки” при ідентифікації неусовного помпажу.

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

Система захисту компресора від помпажу, що вдосконалюється, включає вимірювання певної кількості параметрів, які характеризують

робочий режим компресора [10]. Відповідними давачами вимірюють перепад тиску на звужуючому пристрої перед нагнітачем, швидкість обертання силової турбіни, горизонтальну вібрацію передньої опори нагнітача, вертикальну вібрацію передньої опори нагнітача, горизонтальну вібрацію задньої опори нагнітача, вертикальну вібрацію задньої опори нагнітача, ступінь підвищення тиску.

Під час експлуатації автоматичної системи антипомпажного захисту, що має у своєму складі давачі первинної інформації про параметри, які характеризують робочий режим компресора, виникають проблеми відмови давачів і їх помилкового спрацювання. Одним із шляхів вирішення проблеми є структурний метод [11], що зводиться до об'єднання кількох давачів первинної інформації в один комплексний давач за допомогою пристрою вибору, що забезпечує видачу результуючого сигналу в залежності від вихідних сигналів давачів.

Важливим завданням є вибір кількості давачів первинної інформації, що входять в комплексний давач з  $n$  однаковими вихідними сигналами з давачів первинної інформації, при отриманні сигналу від яких має спрацювати система антипомпажного захисту.

Припустимо, що на давачі первинної інформації (рис. 3) діють некорельовані випадкові завади, внаслідок чого їх спрацювання носить випадковий характер і не залежить один від одного.

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

Випадковий характер спрацювання давачів первинної інформації веде до виникнення помилок двох видів [12]:

- помилка першого роду – відмова давача при виникненні явища помпажу;
- помилка другого роду – хибне спрацювання давача.

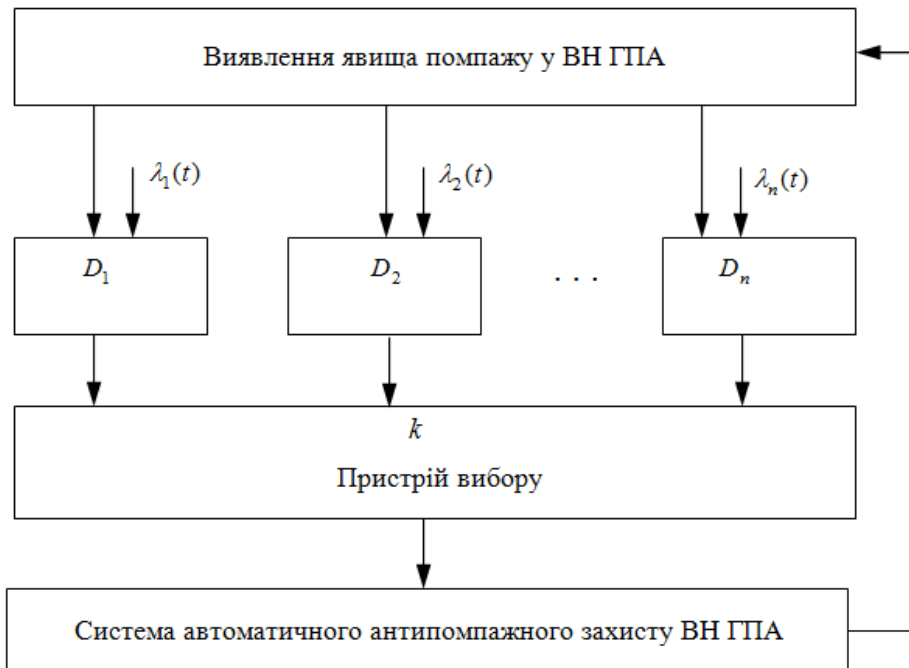


Рисунок 3 – Схема роботи комплексного давача первинної інформації:  $D_1, D_2, \dots, D_n$  – давачі первинної інформації в САК ГПА,  $k$  – кількість давачів, що входить в комплексний давач

Позначаючи ймовірність помилки першого роду через  $\alpha$ , а ймовірність помилки другого роду через  $\beta$ , запишемо ймовірності помилок першого роду  $\alpha$  (відмова більш, ніж  $n - k$  давачів) і другого роду  $p_\beta$  (хибне спрацьовування не менше  $k$  давачів):

$$p_\alpha = 1 - \sum_{i=k}^n C_n^i (1-\alpha)^i \alpha^{n-i}, \quad (1)$$

$$p_\beta = \sum_{i=k}^n C_n^i \beta^i (1-\beta)^{n-i}.$$

У загальному випадку критерій вибору параметра  $k$  може бути представлений як мінімум зваженої суми помилок першого і другого роду комплексного давача:

$$L_1 = Ap_\alpha + Bp_\beta = A - \sum_{i=k}^n C_n^i [A(1-\alpha)^i \alpha^{n-i} - B\beta^i (1-\beta)^{n-i}] \rightarrow \min_k, \quad (2)$$

де  $A, B$  - вагові коефіцієнти:  $A \geq 0, B \geq 0, A + B = 1$ .

Завдання мінімізації (2) еквівалентне задачі максимізації:

$$L_2 = \sum_{i=k}^n C_n^i [A(1-\alpha)^i \alpha^{n-i} - B\beta^i (1-\beta)^{n-i}] \rightarrow \max_k. \quad (3)$$

Нехай ймовірність спрацьовування перевершує ймовірність хибного спрацьовування  $1 - \alpha > \beta$ . У цьому випадку функція

$$A(1-\alpha)^x \alpha^{n-x} - B\beta^x (1-\beta)^{n-x} \quad (4)$$

є монотонно зростаючою при  $x \in [0, n]$ .

Проводячи міркування, аналогічні [12], отримаємо, що максимум виразу (3) буде досягатися при значенні  $k$ , що дорівнює найближчого зверху

до  $x_0$  цілому числу, але не більшому  $n$ . Значення  $x_0$  визначається з виразу:

$$x_0 = \frac{\ln \frac{B}{A} + n \ln \frac{1-\beta}{\alpha}}{\ln \left( \frac{1-\alpha}{\beta} \cdot \frac{1-\beta}{\alpha} \right)}. \quad (5)$$

Поряд з вірогідністю помилок першого і другого роду, вибір числа  $k$  буде визначатися ваговими коефіцієнтами  $A, B$ , що входять в цільову функцію (2).

Розглянемо наступні варіанти вибору вагових коефіцієнтів

- критерій ідеального спостерігача: якщо  $A = B = 0.5$ , тоді вираз (5) набуває вигляду:

$$x_0 = n \frac{\ln \frac{1-\beta}{\alpha}}{\ln \left( \frac{1-\alpha}{\beta} \cdot \frac{1-\beta}{\alpha} \right)}, \quad (6)$$

- критерій мінімуму ймовірності помилки:  $A = p_{номт}, B = 1 - p_{номт}$ , де  $p_{номт}$  ймовірність виникнення явища помпажу (апріорна). Тоді вираз (5) може бути записано у вигляді:

$$x_0 = \frac{\ln \frac{1-p_{номт}}{p_{номт}} + n \ln \frac{1-\beta}{\alpha}}{\ln \left( \frac{1-\alpha}{\beta} \cdot \frac{1-\beta}{\alpha} \right)}, \quad (7)$$

- критерій мінімуму очікуваної шкоди від помилки:

$$A = p_{номт} u_\alpha, B = (1 - p_{номт}) u_\beta, \quad (8)$$

$$u_{\alpha} = \frac{U_{\alpha}}{U_{\alpha} + U_{\beta}}, u_{\beta} = \frac{U_{\beta}}{U_{\alpha} + U_{\beta}},$$

де  $U_{\alpha}$  - шкода від помилки першого роду (різниця між шкодою від явища помпажу без спрацьовування системи автоматичного антипомпажного захисту і за умови, коли вона спрацьовує);  $U_{\beta}$  - шкода, викликана хибним запуском системи автоматичного антипомпажного захисту. В цьому випадку вираз (5) набуде вигляду:

$$x_0 = \frac{\ln \frac{(1-p_{номт})U_{\beta}}{p_{номт}} + n \ln \frac{1-\beta}{\alpha}}{\ln \left( \frac{1-\alpha}{\beta} \cdot \frac{1-\beta}{\alpha} \right)}. \quad (9)$$

Порівняння виразів (6) - (9) показує, що для малих апріорних ймовірностей виникнення явища помпажу  $p_{номт}$  застосування критерію мінімуму ймовірності помилки буде давати більші значення числа  $k_0$ , ніж застосування критерію ідеального спостереження. При цьому можлива ситуація, коли  $k_0 = n$ , тобто застосування комплексного давача зводиться тільки до зменшення ймовірності помилкового спрацьовування. Якщо шкода від помилки першого роду перевищує шкоду від помилки другого роду, то застосування критерію мінімуму очікуваної шкоди призводить до зменшення значення числа  $k_0$  в порівнянні з критерієм мінімуму ймовірності помилки.

#### Висновки.

Застосування системи антипомпажного захисту і керування відцентрових нагнітачів газоперекачувальних агрегатів дотискувальних компресорних станцій підземних сховищ газу нерозривно пов'язане з використанням давачів первинної інформації про явище помпажу, проблемою їх відмови, а також помилкового спрацьовування в процесі експлуатації. Показано, що вирішення цієї проблеми є використання методу, що зводиться до об'єднання кількох давачів первинної інформації в один комплексний давач за допомогою пристрою вибору, що забезпечує видачу результуючого сигналу в залежності від вихідних сигналів давачів. Випадковий характер спрацьовування давачів первинної інформації веде до виникнення помилок першого і другого роду. В якості критерію оптимальності використано зважену суму ймовірностей виникнення помилок.

1. Продовиков С. Опыт автоматизации сложных промышленных объектов на примере газокompрессорных станций / С. Продовиков, А.Макаров, В.Бунин, А.Черников // Системная интеграция. Нефтегазовая промышленность. – 1999. – №2. – С.16–25. 2. Зельмат Мимун. Методы исследования управления режимами работы трубопроводнотранспорта газа: дис... на

соискание уч.степени док. техн. наук по специальности: 0513.07: «Автоматизация производственных процессов»/ Зельмат Мимун. – М., 1992. – 332 с. 3. Казакевич В.В. Автоколебания (помпаж) в компрессорах / В.В. Казакевич. – М.: Машиностроение.– 1974.– 264 с. 4. Герасименко В.П. Анализ процессов и разработка методов повышения эффективности компрессоров на нерасчетных режимах работы [Текст] : Дис...д-ра техн. наук: 05.04.12 / Герасименко Владимир Петрович ; ХАИ им. Н.Е.Жуковского. – Х., 1993. – 352 с. 5. Ніцета В.В. Десятирічний досвід експлуатації протипомпажного захисту типу УЗП–03 на КС «Ромни» Сумського ЛВУ МГ / В.В. Ніцета, М.М. Скулкін, Є.О. Суханов, С.А. Пономаренко // Інформаційний огляд. ДК «Укртрансгаз». – Київ.– 2006.– №2.–с. 8–11, іл.5. 6. Ніцета В.В. Дослідження роботи нагнітача RF–2BB–30газоперекачувального агрегату у передпомпажній зоні / В. В. Ніцета, О. В. Свістельник, П.І. Пателюх, Г.М. Чижман // Інформаційний огляд. ДК «Укртрансгаз». – 2006. – № 4(40). – С. 15–17. 7. Слободян А. В. Система передпомпажного попередження та визначення робочої точки газоперекачувального агрегату типу ГТК–10 на базі мікро-процесорного контролера МІК–51 / А. В. Слободян // Нафтогазова енергетика. – 2007. – № 3. – С. 31–34. 8. Тельнов К.А. Автоматизация газоперекачивающих агрегатов с газотурбинным приводом / К.А. Тельнов, А. А. Файнштейн, С. З. Шабашов // Учебное пособие. Ленинград: Недра, 1983. – 280 с. 9. Бляут Ю.Є. Автоматическая идентификация помпажных характеристик газоперекачивальных агрегатов з газотурбінним приводом для ефективного регулювання: автореферат дисертації на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук: 05.13.07 / Юрій Свстахович Бляут; Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу. -Івано-Франківськ, 2013.-20с. 10. Патент 89302 Україна. Спосіб захисту компресора від помпажу [Текст] / М. В. Беккер, Р. Я. Шимко, Г. Н. Семенов, Ю. Є. Бляут, С. Г. Гіренко, М. О. Петеш, О. В. Сукач, А. Ф. Репета.– №200807810; заявл. 09.06.2008; опубл. 11.01.2010, Бюл. № 1. – 6 с. 11. Абрамов Ю. А. Повышение эффективности обнаружения пожара по температуре / Ю.А. Абрамов, В.М. Гвоздь, Е.А. Тищенко // Харьков: НУГЗУ. – 2011. – 129 с. 12. Поспелов Б. Б. Структурный метод повышения надежности датчиков первичной информации в системе ослабления последствий чрезвычайной ситуации / Б.Б. Поспелов., А. Е. Басманов // Збірка наукових праць. – Випуск 14. – 2011. –с.129–134.

Поступила в редакцію 09.11.2016 р.

Рекомендували до друку: докт.техн.наук, проф. Райтер П.М., докт. техн. наук, проф. Олійник А.П.