



УКРАЇНА

(19) UA (11) 89302 (13) C2
(51) МПК (2009)
F04D 27/02

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ
І НАУКИ УКРАЇНИ

ДЕРЖАВНИЙ ДЕПАРТАМЕНТ
ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ
ВЛАСНОСТІ

ОПИС ДО ПАТЕНТУ НА ВИНАХІД

(54) СПОСІБ ЗАХИСТУ КОМПРЕСОРА ВІД ПОМПАЖУ

1

2

(21) а200807810

(22) 09.06.2008

(24) 11.01.2010

(46) 11.01.2010, Бюл.№ 1, 2010 р.

(72) БЕККЕР МИХАЙЛО ВІКТОРОВИЧ, ШИМКО РОМАН ЯРОСЛАВОВИЧ, СЕМЕНЦОВ ГЕОРГІЙ НИКИФОРОВИЧ, БЛЯУТ ЮРІЙ ЄВСТАХІЙОВИЧ, ГІРЕНКО СЕРГІЙ ГЕННАДІЙОВИЧ, ПЕТЕШ МИКОЛА ОРЕСТОВИЧ, СУКАЧ ОЛЕКСІЙ ВАСИЛЬОВИЧ, РЕПЕТА АНДРІЙ ФЕДОРОВИЧ

(73) ІВАНО-ФРАНКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ НАФТИ І ГАЗУ

(56) US 6298718 B1, 09.19.2001

UA 52128 A, 16.12.2002

UA 5427 U, 15.03.2003

US 2008/0101914 A1, 01.05.2008

US 6317655 B1, 13.11.2001

RU 2303716 C2, 27.07.2007

UA 47153 A, 17.06.2002

UA 62372 A, 15.12.2003

(57) Спосіб захисту компресора від помпажу, що включає вимірювання параметрів, які характеризують робочий режим компресора, визначають за ним координати робочої точки компресора, визначають віддаленість їх від заданої величини і пропорційно їй змінюють стан органів управління компресора, який **відрізняється** тим, що вимірюють відповідними датчиками перепад тиску на конфузори нагнітача, швидкість обертів силової турбіни газотурбінного приводу та нагнітача, віброперемі-

щення горизонтальне задньої опори нагнітача, вібропереміщення вертикальне задньої опори нагнітача, вібропереміщення горизонтальне передньої опори нагнітача, вібропереміщення вертикальне передньої опори нагнітача, осьовий зсув нагнітача, де вихід кожного датчика 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 усередненим попереднім значенням, яке обчислене з таблиці контролерного стека за певний проміжок часу, яке враховується алгоритмом для обрахування нового середнього значення кожного параметра при надходженні кожного чергового по такту, після чого визначають коефіцієнт параметра як співвідношення усередненого значення певного параметра за таблицею стека до поточного значення контрольованого параметра від датчика, перевищення якого над наперед заданим коефіцієнтом за певним параметром класифікується алгоритмом як ознака наявності помпажних коливань за параметром і заноситься в оперативну таблицю запам'ятовування, де, при виникненні ознак наявності помпажних відхилень не менше ніж за чотири параметрами, формується сигнал про наявність помпажу в компресорі, який подають на виконавчі органи САК.

Винахід належить до галузі транспортування газу, а саме, до системи контролю та регулювання роботою нагнітачів відцентрового типу на газоперекачувальних агрегатах (ГПА) газотурбінного типу. Може застосовуватись, також, на компресорних станціях підземного сховища газу.

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 яких 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 підвищених об'ємів рециркуляції та перевитрат паливного газу.

На даний час відомо декілька методів контролю за передпомпажним станом ГПА: методи, що визначаються витратно-напірними характеристиками нагнітача, та методи, що ґрунтуються на виявленні коливань у проточній частині нагнітача, які характерні для передпомпажних та помпажних явищ.

Суть непрямих методів розрахунку визначення границь помпажу за витратно-напірними характеристиками нагнітача полягає в тому, що розрахо-

(13) C2

(11) 89302

(19) UA

вують положення робочої точки нагнітача на основі паспортних витратно-напірних характеристик нагнітача з прив'язкою до паспортної лінії границі помпажу. Далі розраховують необхідний запас за приведеною витратою до границі помпажу, та визначають лінію захисту від помпажу. Потім значення величин визначеної лінії вводять у пристрій захисту від помпажу, чим запобігають переходу робочої точки нагнітача в зону небезпечних режимів, попереджаючи виникнення помпажу. Разом з тим, точка входу в зону помпажу, як і робоча точка нагнітача, постійно змінюється не тільки по відношенню одна до одної, але і по відношенню до даного значення лінії захисту від помпажу, що вимагає перенастроювання такої лінії.

До головних недоліків цього методу можна віднести:

- необхідність регулярного введення робочої точки нагнітача в зону помпажу для уточнення положення границі помпажу та коригування установок спрацювання протипомпажних систем;
- велика похибка розрахунків помпажних характеристик;
- недостатня надійність захисту від помпажу за допомогою систем антипомпажного захисту, побудованих на цьому принципі;
- необґрунтовані запаси по помпажу призводять до перевитрат паливного газу.

[Казакевич В.В. Автоколебания (помпаж) в компрессорах. М.: Машиностроение, 1974.]

До методів, що базуються на визначенні витратно-напірних характеристик, належить спосіб захисту газоперекачувального агрегату від помпажу [Патент UA№5427, Бюл. №3, 2005р.], за яким проводиться вимірювання поточних значень параметрів, що характеризують положення робочої точки компресора, уточнення і запам'ятовування положення межі помпажу і формування вихідного сигналу антипомпажного регулятора пропорційно віддаленості робочої точки компресора від межі помпажу, де уточнення положення межі помпажу виконують шляхом виявлення переходу робочої точки одного чи декількох каналів робочого колеса компресора на неробочу ділянку витратно-напірної характеристики, для чого підключають вихід блока вимірювання вібрації компресора до додаткового входу антипомпажного регулятора, періодично переводять антипомпажний регулятор у стан корекції, поступово знижують частоту обертання компресора з темпом, що не перевищує витратного рівня, безупинно виконують цифрову фільтрацію вихідного сигналу блоку вимірювання вібрації компресора, виділяючи сигнал вібрації, частота якого співпадає з частотою обертання компресора, вимірюють амплітуду цього сигналу, вираховують поточне відношення значення приросту амплітуди до приросту частоти обертання, у момент перевищення цього відношення над вибраним максимальним, реєструють поточне значення розрахункової віддаленості як поправку на віддаленість, після чого збільшують частоту обертання компресора до вихідного значення, переводять антипомпажний регулятор у робочий стан, і далі сигнал керування антипомпажним клапаном формують з урахуванням уточненого значення віддаленості,

яке визначають як добуток розрахункового значення віддаленості та поправки на віддаленість.

Надійність захисту даного винаходу забезпечується через те, що уточнення положення межі помпажу здійснюють періодично, а не тільки в моменти, коли компресор потрапляє в помпаж, але сигнал керування антипомпажним регулятором формують на підставі аналізу перехідних процесів, частотних і статистичних характеристик вхідних і вихідних сигналів частоти обертання компресора, а оцінку параметрів помпажних явищ визначають за співвідношеннями, які пов'язують характеристики вихідного сигналу вібрації компресора з параметрами помпажу і характеристиками вхідного сигналу.

Недоліком таких аналітичних методів ідентифікації є необхідність математичного опису вхідних та вихідних сигналів, наприклад, вібрації або їх статистичних характеристик. Неточність ідентифікації при цьому безпосередньо пов'язана з похибкою обчислень, неточністю математичного опису сигналів, обумовленою наявністю завод і нестаціонарністю. До того ж слід зазначити, що помпаж виникає незалежно від зносу підшипників, неспіввідносності валів, відмов в редукторах або інших технологічних відмов. Виникнення помпажних явищ є непередбачуваним та пов'язане із сторонніми технологічними впливами, такими як аварійна зупинка сусіднього ГПА, зупинка іншої ступені газоперекачувальних агрегатів, неспрацювання станційної кранової арматури.

Найбільш близьким до запропонованого винаходу відомий спосіб захисту компресора від помпажу [Патент UA №52128, Бюл. №12, 2002р.], згідно з яким вимірюють комплекс параметрів, які характеризують робочий режим компресора, визначають за ним координати робочої точки компресора, визначають віддаленість їх від заданої величини і пропорційно їй змінюють стан органів управління компресора, а саму задану величину коректують у момент початку помпажу заміною старого значення на поточне значення координат робочої точки компресора, де поточне значення віддаленості визначають безперервно із швидкістю, яка перевищує швидкодію органів управління і мінімально можливий час виникнення жорсткого помпажу, на поточному інтервалі часу, відповідному швидкодії органів управління компресора, визначають мінімальне значення віддаленості і використовують його в якості поточного значення віддаленості при керуванні органами управління.

Даний спосіб захисту компресора від помпажу здійснюється в робочому режимі компресора. При цьому вимірюють такі параметри, які характеризують флуктуації газового потоку, такі як тиски та температури газу на вході та виході компресора, частоту обертів 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 явища, при яких відбуваються пульсації потоку газу, що призводять до входження робочої точки нагнітача в нестаціонарний режим роботи, викликають збільшення вібрації опор нагнітача, осьовий зсув вала нагнітача нагнітача, трубопроводів об'язки; зміну напрямку осьового зусилля на ротор

нагнітача і силової турбіни, яке стає знаковим; циклічну зміну навантаження приводу нагнітача, тому вимірювання параметрів, які характеризують тільки флуктуації газового потоку, не є достатнім для аналізу та встановлення зв'язків між розвитком помпажних явищ в нагнітачі, та отупінню їх впливу на характер зміни технологічних параметрів, щоб забезпечити підтримання робочої точки характеристики нагнітача поблизу помпажної зони.

Режим роботи нагнітача природного газу постійно змінюється впродовж експлуатації, що викликає 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 того, ці зміни можуть вивести з рівноваги систему "нагнітач - мережа", що призведе до аварії. Одними з найнебезпечнішими порушеннями 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 секунди.

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

Коливання в потоці газу досягають до 50% і мають гармонійний характер. Цей режим носить назву "м'який" помпаж. Розвиток і збільшення зривних зон призводить до охоплення близьких областей об'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 і магістраль із сторони всмоктування або нагнітання. Цей режим характеризується великими об'ємами перекачаного газу, що обумовлює різке збільшення потужності коливань, яке скоріше призводить до аварійних ситуацій.

В основу винаходу 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 ступінню впливу його на характер зміни групи 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, які характеризують робочий режим компресора, визначають віддаленість їх від заданої величини і пропорційно їй змінюють стан органів управління компресора, згідно з винаходом, вимірювання параметрів, які характеризують робочий режим компресора, включає вимірювання відповідними давачами перепаду тиску на конфузори нагнітача, швидкості обертів силової турбіни газотурбінного приводу та нагнітача, вібропереміщення горизонтального задньої опори нагнітача, вібропереміщення вертикального задньої опори нагнітача, вібропереміщення горизонтального передньої опори нагнітача, вібропереміщення вертикального передньої опори нагнітача, осьового зсуву нагнітача, де вихід кожного давача з'єднаний з відповідними входами АЦП сигналізатора 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 враховується середнє значення кожного параметру, яке враховується алгоритмом для обрахування нового середнього значення кожного параметра при поступленні кожного чергового по такту, після чого визначають коефіцієнт по параметру як співвідношення усередненого значення певного параметра за таблицею стеку до поточного значення контрольованого параметру 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 газу на конфузори нагнітача, швидкість обертів силової турбіни газотурбінного приводу і відповідно - нагнітача, вібропереміщення горизонтальне задньої опори

нагнітача, вібропереміщення вертикальне задньої опори нагнітача, вібропереміщення горизонтальне передньої опори нагнітача, вібропереміщення вертикальне 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 контроллера, виконавчі органи САК, функціонує в одному темпі з керуванням 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 контроллера, згідно з яким оцінюються параметри ГПА за результатами спостережень вхідних сигналів від давачів, миттєво порівнюються з попереднім обрахованим середнім значенням кожного параметра, яке враховується 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 помпажних коливань, де при виникненні не менше чотирьох ознак наявності помпажних відхилень певного параметра і не менше ніж за чотири параметрами, формується сигнал, який передається до керуючого пристрою. Таким чином досягається максимальна швидкодія системи захисту ГПА від помпажу.

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

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

Винахід ілюструється кресленням де на Фіг. наведена структурна схема способу здійснення захисту компресора від помпажу (приклад).

Система, яка реалізує заявлений спосіб захисту компресора від помпажу складається з наступних елементів. Група давачів, встановлених на газотурбінній установці, що забезпечують вимірювання технологічних параметрів роботи компресора включає: 1 - давач швидкості обертів силової турбіни газотурбінного приводу і відповідно нагнітача; 2 - давач перепаду тиску газу на конфузори нагнітача; 3 - давач вібропереміщення горизонтального задньої опори нагнітача; 4 - давач вібропереміщення вертикального задньої опори нагнітача; 5 - давач вібропереміщення горизонтального пе-

редньої опори нагнітача, 6 - давач вібропереміщення вертикального передньої опори нагнітача, 7 - давач осьового зсуву нагнітача. Вихід кожного давача з'єднаний з відповідними блоками АЦП, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, де вихідні сигнали кожного давача перетворюються у цифрову форму і надходять у програмний модуль 22 контроллера, кожен по індивідуальному каналу, 15, 16, 17, 18, 19, 20, 21, відповідно.

Після алгоритмічної обробки у програмному модулі контроллера 22 кожного з сигналів, сформований сигнал за кожним параметром про наявність помпажу в компресорі надходить в систему автоматичного керування (САК) 23. Одночасно з цим сигнали з 22 надходять в обчислювальну машину 24, де забезпечується візуальний нагляд оператора за формуванням сигналів за кожним параметром про наявність помпажу в компресорі.

Спосіб захисту компресора від помпажу реалізується наступним чином.

В робочому режимі компресора вимірюють комплекс параметрів, які характеризують технічний стан ГПА, впливають на режим роботи нагнітача і можуть привести його робочу точку на характеристиці в нестійку зону. З виходу давача 1 на відповідний вхід 8 АЦП надходить сигнал про поточне значення швидкості обертів силової турбіни газотурбінного приводу і нагнітача, з виходу 2 давача перепаду тиску на конфузори нагнітача надходить сигнал на канал АЦП 9, з давача 3 вібропереміщення горизонтального задньої опори нагнітача - на канал АЦП - 10, з давача 4 - вібропереміщення вертикального задньої опори нагнітача - на канал АЦП 11, з давача 5 вібропереміщення горизонтального передньої опори нагнітача - на канал АЦП 12, з давача 6 вібропереміщення вертикального передньої опори нагнітача - на канал АЦП 13, з давача 7 осьового зсуву нагнітача - на канал АЦП 14. Сигнали з давачів, перетворені у відповідних каналах АЦП в цифрову форму, надходять кожен по відповідному каналу в програмний модуль контроллера 22, де здійснюється алгоритмічна обробка кожного з сигналів по індивідуальному каналу 15, 16, 17, 18, 19, 20, 21 відповідно, забезпечуючи миттєве порівняння поточного, щойно прийнятого значення з попередніми, що надійшли до контрольного стеку програмного модуля за певний проміжок часу. На підставі даних, що надійшли від кожного давача програмний модуль контроллера визначає середнє значення відповідного параметра за цей проміжок часу. Кожне наступне поточне значення відповідного параметра, що надходить в програмний модуль від кожного давача по індивідуальному каналу, спочатку порівнюється із середнім значенням, яке обчислене внаслідок обробки стеку по параметру і після цього заноситься в таблицю стеку. Це нове усереднене значення використовується алгоритмом для обрахування наступного чергового в такті значення параметра. Занесені в таблицю стеку результати обробки по кожному параметру застосовують для визначення коефіцієнта параметра $K_{\text{парам}}$ як співвідношення S усередненого значення окремого параметра в таблиці стеку до поточного значення контрольованого параметра від давача знач.вхід.

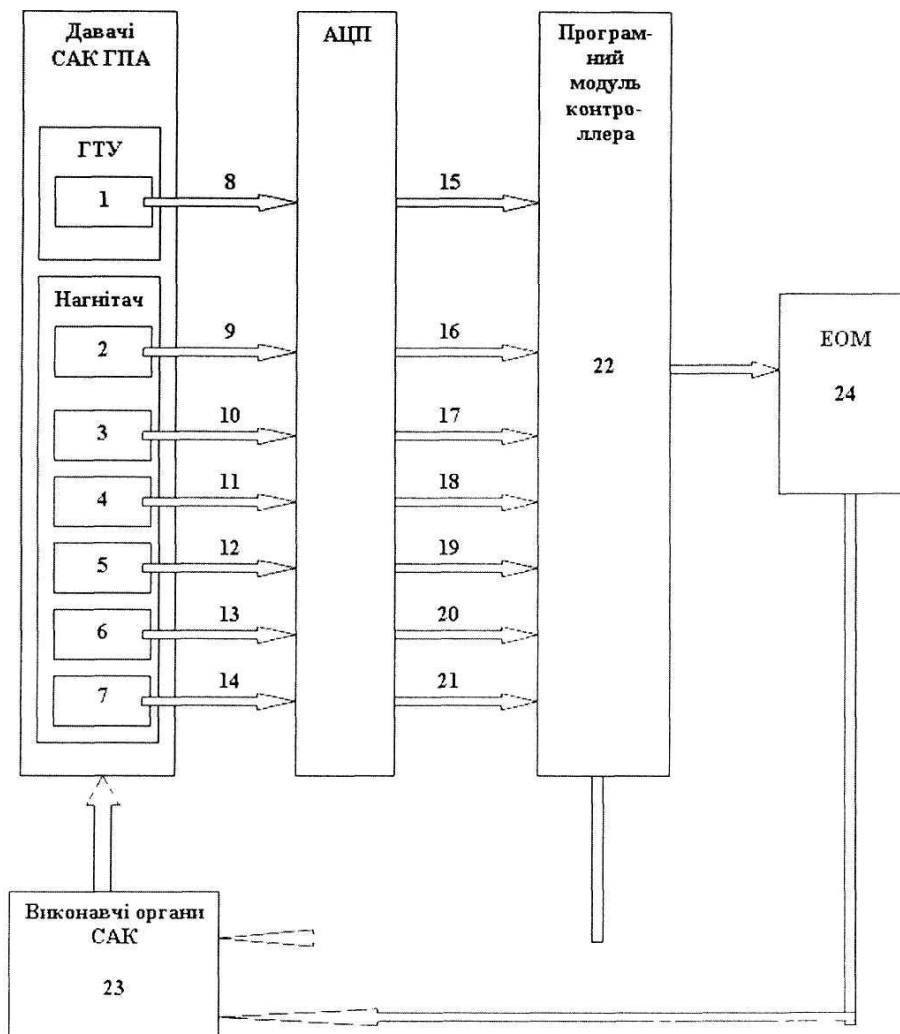
$$K_{\text{парам}} = \frac{C}{\text{знач.вхід}}$$

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

Отримані експериментальним шляхом значення коефіцієнтів $K_{\text{парам}}$ по кожному параметру заносяться в алгоритм обробки програмного модуля контроллера як ознаки виникнення помпажного стану в нагнітачі та мають відповідний вплив на відповідні вимірювані параметри. Перевищення окремих, встановлених в алгоритмі порівняння меж порогових значень кожного $K_{\text{парам}}$ класифікується алгоритмом як ознака наявності помпажних коливань за параметром і фіксується підняттям сигнальної мітки з ознакою ступеню перевищення. Умовно мітки класифікуються на три рівні і виводяться алгоритмом "формування ознаки якості

помпажу за параметром" як передпомпажний стан, стан "м'якого" помпажу, "жорсткий" помпаж.

При виникненні мітки з ознакою помпажних коливань за параметром, певна мітка фіксується алгоритмом і заноситься в оперативну таблицю запам'ятовування міток на час $T_{\text{стек}}$ таймер. При виникненні не менше чотирьох міток з ознакою наявності помпажних відхилень, не менше як за чотирма параметрами (каналами), формується сигнал про наявність помпажу в компресорі газоперекачувального агрегату, який подають на виконавчі органи САК 23. Внаслідок впливу на режим агрегату виконавчими органами, відбувається стабілізація режиму роботи газоперекачувального агрегату та віддалення від помпажної зони нагнітача, що призводить до зняття алгоритмом міток з ознакою наявності помпажних відхилень. Одночасно сигнал поступає з 22 на обчислювальну машину 24, де здійснюється візуальний нагляд за формуванням сигналів за кожним параметром про наявність помпажу в компресорі.



Фіг.

