

УДК 681.518.5

## **АКУСТИЧНИЙ МОНІТОРИНГ ГАЗОПЕРЕКАЧУВАЛЬНОГО АГРЕГАТА Ц-6,3 ДКС «ОПАРІ-2» УМГ «ЛЬВІВТРАНСГАЗ»**

**М.О. Петеш**

*ІФНТУНГ, 76019, м. Івано-Франківськ, вул. Карпатська, 15, тел. (03422) 46067*

*e-mail: kafatp@ukr.net*

*Сформульована постановка задачі для виявлення випадкового моменту появи помпажа в газоперекачувальному агрегаті, коли розподіл моменту розладки априорі невідомо, що дозволило вибрати ефективний алгоритм для виявлення початку помпажа, дослідити його чутливість і завадостійкість інформаційно-вимірювального каналу.*

**Ключові слова:** акустичний моніторинг, помпаж, газоперекачувальних агрегат, метрологічна атестація

*Рассматривается направление использования звуковых характеристик работающего газоперекачивающего агрегата (ГПА) для оперативного контроля процесса компримирования газа и метрологической аттестации измерительных каналов. В основу предложенной системы мониторинга газоперекачивающих агрегатов положена возможность использования звуковых сигналов от лопаток, подшипников, узлов крепления корпуса ГПА для наблюдения за акустическим вибрационным состоянием ГПА и предпомпажными явлениями.*

**Ключевые слова:** акустический мониторинг, помпаж, газоперекачивающих агрегат, метрологическая аттестация

*In the article direction of the use of voice descriptions of working gas-pumping aggregate (GPA) is resulted for operative control of process of gas metrology attestation of the measurings ductings. In basis of the offered system of monitoring of gas-pumpings aggregates possibility of the use of voice signals is fixed from shoulder-blades, bearings, knots of кріплення corps of GPA for looking after the oscillation state of GPA and before pompage phenomena*

**Keywords:** acoustic monitoring, surging, hazoperekachyvayuschy unit metrological certification

Проблема контролю режимів роботи газоперекачувальних агрегатів (ГПА) природного газу є об'єктом досліджень багатьох вітчизняних і зарубіжних вчених [1, 2, 3 та ін.]. Синтез ефективних систем моніторингу технічного стану ГПА є актуальною науково-прикладною задачею у зв'язку з необхідністю запобігання аварійним ситуаціям, що можуть виникнути в процесі компримування природного газу [3, 6, 7], та інтенсивним впровадженням в газотранспортній системі України автоматичних систем керування газоперекачувальними агрегатами (САК ГПА) [8] нового покоління.

Проте, аналіз літературних джерел [1÷8 та ін.] свідчить про недостатній об'єм проведених досліджень в контексті використання акустичних методів моніторингу технічного стану ГПА і порівняння аналогічних методів. Тому метою даної роботи є розробка і обґрунтування методу, необхідного для метрологічної атестації електричних трактів акустичного моніторингу ГПА та подальшого використання їх для автоматизації процесу керування.

З існуючих наукових досліджень [1÷8 та ін.] відомо, що під час роботи ГПА всі його деталі і вузли здійснюють вимушені і резонансні коливання аеродинамічного і механічного походження. Це викликає вібрацію газотурбінного приводу і відцентрового нагнітача, що супроводжується появою певних рівнів звукових тисків, які досягають 140 Дб (200 Па) і вище. Такі рівні тисків призводять до порушень в роботі вимірювальної апаратури, а також елементів системи САК ГПА. Крім того, високий рі-

вень звукових тисків є ознакою помпажу, тобто зриву потоку газу з лопаток колеса нагнітача з можливим прориванням його з нагнітального патрубку у всмоктуючий, що супроводжується значною вібрацією, шумом, різкою зміною робочих параметрів ГПА. Це формує нагальну потребу у вимірюванні рівнів акустичного тиску з метою виявлення початку появи явища помпажу в нагнітачі ГПА.

Що стосується термінів і методики вібраційного обстеження ГПА, то вони регламентуються нормативними документами [4÷7], у відповідності з якими стан ГПА визначається за середньоквадратичним відхиленням віброшвидкості переміщення окремих його вузлів. Оскільки обстеження ГПА відбувається у регламентні терміни поза увагою залишається факт виявлення моментів зміни рівнів акустичного фону ГПА в реальному часі, що дало б можливість зробити висновки про відхилення в роботі обладнання. Розв'язанням проблеми акустичного моніторингу ГПА в реальному часі дає змогу виявити зміни технічного стану агрегату в процесі експлуатації ГПА та зробити висновки про можливість появи помпажних явищ.

Для вимірювання звукових тисків високої інтенсивності необхідні давачі акустичного тиску, які придатні для роботи в реальних умовах експлуатації ГПА, що задовольняють вимозі мінімального викривлення акустичного поля, мають широкий діапазон робочих частот, тисків і температур. Більшості з цих вимог задовольняють п'єзоелектричні перетворювачі фірми "Siemens". Вони мають високу чутливість та

**Таблиця 1 – Перелік ВК САК ГПА та МХ ЕТ і ПВП**

Назва ВК та місця встановлення ПВП на об'єкті	Діапазон вимірювання		Тип давача ПВП	Довірча границя допустимої зведеної похибки, %	
	Повний (робочий)	Сигналізація		Електричного тракту	ПВП
<b>Вібрація</b>					
Вібрація ПОД (гориз.складова), мм/с	0...100	40...60	БЭ-38-6М	±0,5	±1
Вібрація ЗОД (гориз.складова), мм/с	0...100	40...60	БЭ-38-6М	±0,5	±1
Вібрація ЗОД (вертик.складова), мм/с	0...100	40...60	БЭ-38-6М	±0,5	±1
Вібрація ПОН (гориз.складова), мм/с	0...250	60...80	Metrix	±0,5	±1
Вібрація ПОН (вертик.складова), мм/с	0...250	60...80	Metrix	±0,5	±1
Вібрація ЗОН (гориз.складова), мм/с	0...250	60...80	Metrix	±0,5	±1
Вібрація ЗОН (вертик.складова), мм/с	0...250	60...80	Metrix	±0,5	±1
<b>Сигнали керування виконавчими механізмами</b>					
Керування ДГ, %	0...100			±0,2	±1
Керування АПК, %	0...100			±0,2	±1
<b>Контроль позиції виконавчих механізмів</b>					
Позиція ДГ, %	0...100			±0,2	±1

ПОН – передня опора нагнітача; ПОД – передня опора двигуна; ДГ – дозатор газу;  
 ЗОН – задня опора нагнітача; ЗОД – задня опора нагнітача; АПК – антипомпажний клапан.

широкий діапазон частот, тому їх застосовують в широкому діапазоні температур і статичних тисків [9]. Це дає змогу застосовувати п'єзOMETричні методи для вимірювання рівню шуму від газових пальників енергетичних котлів [10], для акустичного каротажу і технологічних вимірювань в нафтогазовій галузі промисловості [11] та ін.

В динамічному відношенні п'єзOMETричні вимірювальні перетворювачі є безінерційними ланками [12]. Величина коефіцієнта їх передачі (чутливості) залежить від фізичних властивостей і геометричних розмірів кристалу, напрямку дії сили (вздовж електричної осі  $x$  або перпендикулярно їй – вздовж осі  $y$ ) і може бути розрахована за формулами:

$$K_x = \frac{e}{C_K + C_{ВХ}}; \quad K_y = \frac{ey}{x(C_K + C_{ВХ})}, \quad (1)$$

де:  $e$  – п'єзOMETрична стала (для кварцу  $e = 2,14 \cdot 10^{-12}$  кл/Н, для титанату барію  $e = 1,22 \cdot 10^{-10}$  кл/Н);

$x$  і  $y$  – лінійні розміри давача вздовж координатних осей  $x$  і  $y$ , м;

$C_K$  – ємність кристалу, Ф;

$C_{ВХ}$  – ємність дровів і вхідного ланцюга, Ф.

Слід зазначити, що акустична чутливість давачів акустичного тиску залежить від їх конструкції, яка може бути біморфним елементом, з деформацією по товщині, складною деформацією стиснення і зсуву.

Проте, дійсна чутливість акустичних давачів може відрізнятися від розрахункової.

Експериментально чутливість акустичних давачів можна визначити за відомою схемою [9], за допомогою якої акустичні коливання створюються експериментальним збуджувачем в трубі Оберста і сприймаються акустичним давачем і взірцевим мікрофоном. Тоді чутливість визначається за формулою:

$$S = \frac{U_{\text{вих}} \cdot S_M \cdot K_M}{U_{\text{м.вих}} \cdot K_D}, \quad (2)$$

де:  $U_{\text{вих}}$  – вихідна напруга акустичного давача;  
 $U_{\text{м.вих}}$  – вихідна напруга перетворювача сигналу мікрофона;

$S_M$  – чутливість мікрофона;

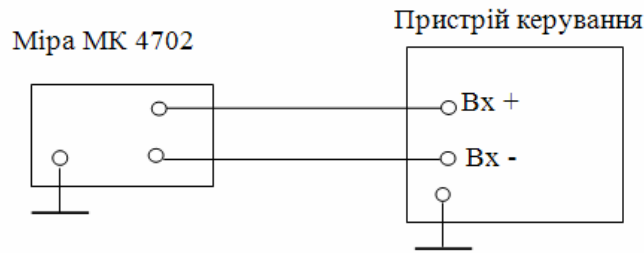
$K_M$  – коефіцієнт підсилення перетворювача сигналу мікрофона;

$K_D$  – коефіцієнт підсилення перетворювача сигналу давача.

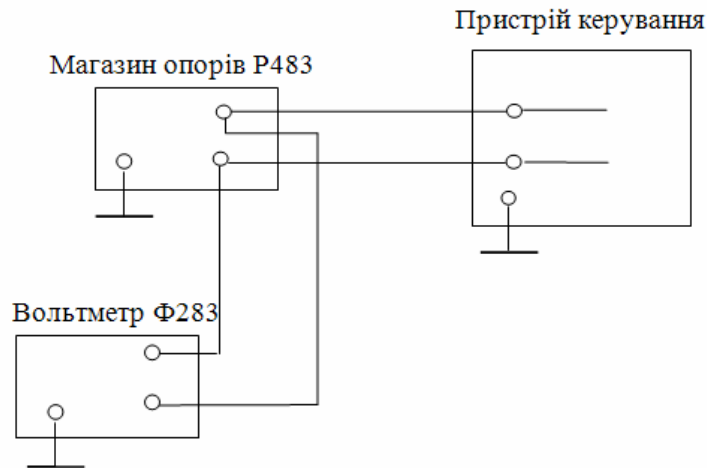
Проте, цей метод неможливо використати в умовах компресорної станції.

Для вирішення цієї задачі запропоновано використати шум, який створюється ГПА в результаті вібрації. Для цього, перш за все, необхідно забезпечити метрологічну атестацію електричного тракту (ЕТ) вимірювання вібрації.

Перелік вимірювальних каналів та метрологічних характеристики (МХ) ЕТ і первинних вимірювальних перетворювачів (ПВП) САК ГПА вказані в таблиці 1.



**Рисунок 1 – Схема МА електричних трактів вібрації двигуна та контролю позиції дозатора газу**



**Рисунок 2 – Схема МА електричних трактів керування антипомпажним клапаном (АПК) і дозатора газу (ДГ)**

Розроблені схеми метрологічної атестації електричних трактів вібрації двигуна та контролю позиції дозатора газу і керування АПК і ДГ зображені на рис. 1, 2.

Із рис. 1, 2 випливає, що при МА САК ГПА експериментальні дослідження ВК через специфіку цієї системи, можливо виконати лише почастинним способом експериментально-розрахунковим методом. При цьому дослідження електричних трактів САК ГПА здійснюють експериментально у відповідності до схем на рис.1,2, а довірчу границю зведеної похибки ВК САК ГПА знаходять розрахунковим методом із врахуванням реальних значень довірчих границь допустимих похибок ПВП, взятих з їхніх паспортів, або із свідоцтв про їх метрологічну атестацію чи повірку.

Експериментальні дослідження ЕТ вібрації ПОД, ЗОД і СТ та контролю позиції ДГ виконують методом прямих вимірювань значень вихідного струму ПВП в діапазоні 4-20 мА, відтвореного калібратором МК4702, при цьому на мірі МК 4702 виставлять 4,00 мА; 8,00 мА; 12,00 мА; 16 мА і 19,84 мА.

Експериментальні дослідження ЕТ управління АПК та ДГ виконують у відповідності до схеми (рис. 1, 2) методом непрямих вимірювань вихідного струму ПК САК ГПА. При цьому силу струму визначають через вимірний за допомогою цифрового вольтметра Ф283 спад напруги на відомому значенні опору (200 або 100 Ом), відтвореному магазином опору Р4831.

Вибір робочих еталонів (РЕ) для МА ЕТ САГ ГПА здійснюють на підставі попереднього аналізу допустимих похибок цих ЕТ та допустимих похибок робочих еталонів, які передбачають використати при МА, вказаних у свідоцтвах про їхню повірку чи МА, а також методики обробки результатів експериментальних досліджень. При цьому перевіряють чи співвідношення допустимих похибок ЕТ САК та допустимих похибок РЕ менше, або рівне трьом, тобто

$$\Omega \leq \Delta_{ET} / \Delta_{PE} \leq 3. \quad (3)$$

Якщо умова (3) виконується, то не вилучену систематичну похибку РЕ в кінцевому результаті не враховують. Якщо умова (3) не виконується, то не вилучену систематичну похибку робочих еталонів слід врахувати, приймаючи рівномірний закон її розподілу.

Вибір допоміжних технічних засобів здійснюють на підставі аналізу методики досліджень, виходячи із структурних схем ЕТ, техніки безпеки тощо.

Перелік необхідних робочих еталонів та допоміжних засобів наведено в таблиці 2.

Засоби вимірювань, вказані у таблиці 2, можуть бути замінені на аналогічні щодо МХ та діапазонів вимірювання. Всі засоби вимірювань повинні мати чинні свідоцтва і (або) тавра про державну повірку чи МА. Заводські номери, які використані в процесі МА ЕТ, вказуються в конкретних протоколах досліджень ЕТ САК ГПА.

**Таблиця 2 – Робочі еталони та допоміжні засоби**

Назва робочого еталону чи засобу МА	Технічні характеристики	Значення технічної характеристики	Мета використання
Магазин опору Р483 або МСР63	Клас точності Діапазон вимірювання	0,02; 0,05 0...111111,1 Ом	Дослідження МХ ЕТ керування АПК і ДГ
Міра комбінована багатозначна МК4702	Клас точності Діапазон вимірювання	0,002 0,0-10999,0 Ом	Дослідження МХ ЕТ вібрації, позиції ДГ
Лабораторний амперметр М2015	Клас точності Діапазон вимірювання	0,2 0-30 мА	Дослідження МХ ЕТ осьових зсувів та вібрації

**Таблиця 3 – Оцінка стану обладнання згідно з ISO 10816-3. Параметри вібрації обладнання**

Швидкість		Потужність 20÷400 л.с. (15÷295 кВт)	Потужність більше 400 л.с. (>295 кВт)
дюйм/с	мм/с		
0,39	7,1	Д	Д
0,25	4,5		С
0,16	2,8	С	В
0,13	2,3	В	
0,08	1,4	А	А
0	0		

Для оптимального вібромоніторингу [13] можна використати директиви стандарту ISO 10816-3 [14], який передбачає чотири діапазони параметрів віброконтролю відносно стану підшипників і приписує рівні тривоги і вимикання для різних каналів обладнання (табл. 3).

Зона А відповідає мінімальному рівню вібрації нового обладнання, в зоні В зношування і вібрація прийнятні для подальшої експлуатації, в зоні С вібрація розглядається як незадовільна (потрібно провести ремонтні міроприємства), в зоні Д вібрація перевищує допустимий рівень (обладнання повинно бути негайно виведено з експлуатації).

Якщо налаштувати програмоване реле IT-401 Alarm на різні рівні спрацювання, у відповідності зі стандартом ISO 10816-3, то можна ефективно передбачати (контролювати) появу помпажних явищ в ГПА, ступінь зношування обладнання і не допустити виходу його з ладу.

IT-401 Alarm здатен працювати з динамічним давачем вібрації (наприклад, Model 786F/793/797) через трансміттер IT-100M, який перетворює сигнал до стандартного виду 4±20 мА, або безпосередньо з давачем серії «Loop Power Sensors» (Model HC450/421/428) вбудована електроніка яких забезпечує формування вихідного сигналу в масштабі 4-20 мА.

Обмін даними з трансміттером забезпечується через вбудовану комунікаційну шину TBUS без зовнішніх кабелів проводів під'єднання.

Три програмованих реле IT-401 можуть бути налаштовані на різні рівні спрацювання:

- перше реле спрацьовує при значенні сигналу, який відповідає переходу від зони В до зони С – рівень попередження;
- друге реле налаштовано на граничний параметр переходу від зони С до зони Д – рівень тривоги;

- третє реле налаштовується на 25% вище параметра переходу С-Д і виконує функцію зупинки обладнання.

Трансміттер IT-Series забезпечує перетворення динамічного сигналу від давача вібрації (mV/g) до стандартного вихідного сигналу 4-20 мА, в якому рівню 4 мА відповідає стан без вібраційних впливів, а рівню 20 мА – максимальний рівень вібрації, небезпечний для подальшої експлуатації.

В залежності від типу застосованого давача, може бути обраний один із варіантів чутливості на вході – 10, 100, 500 mV/g. Передбачена також комутація вхідних сигналів від акселерометра або давача віброшвидкості. Отже, трансміттер формує вихідні сигнали, пропорційні прискоренню, швидкості або зміщенню.

Якщо катастрофічні для функціонування обладнання відмови відсутні, то тенденція розвитку вібраційних відхилень у міру поступового зносу обладнання одна – рівень вібрації зростає до максимального значення. Тому конкретне значення вібрації в масштабі 4-20 мА, якісно характеризує ступінь зношування обладнання без аналізу спектра вібраційних сигналів.

Більш широкі можливості для вібромоніторингу має модель тривоги IT-401 Alarm. Цей модуль забезпечує порівняння зовнішнього сигналу відмасштабованого в діапазоні 4-20 мА, із заданим рівнем спрацювання, при відхиленні від якого кожне програмне реле перемикається.

### Висновок

Запропоновано ефективну систему акустичного моніторингу технічного стану ГПА і метрологічної атестації електричних трактів системи автоматизованого керування ГПА, яка дає змогу уникати аварійних ситуацій, що виникають в процесі компримування природного газу

**Технічна характеристика модуля тривоги ІТ-401**

Напруга живлення	24 ВДС, 150 мА
Вхідний опір (струмова петля)	247,5 Ом
Виходи	3 реле: 8А; 250 ВДС/30 ВДС
Затримка перемикачів реле	0÷99 с
Установка рівнів спрацювання: вібраційний сигнал; напруга зміщення; 4-20 мА, вихід	0-99 % шкали, крок 1% 0-18, крок +В; 2-11 мА
Діапазон температур	Від -40 до +85 °С

в тому числі явищ помпажу. Результати експлуатації системи акустичного моніторингу ГПА Ц-6,3 ДКС «Опарі-2» УМГ «Львівтрансгаз» підтвердили результати теоретичних досліджень.

**Література**

1 Казакевич В.В. Автоколебания (помпаж) в компрессорах / В.В.Казакевич. – М.: Машиностроение. – 1974. – 264 с.

2 Автоматизация процессов газовой промышленности / [Шайхутдинов А.З. и др.]; под общ.ред. А.З.Шайхутдинова]. – Санкт-Петербург: Наука. – 2003. – 420 с.

3 Гіренко С.Г. Метод автоматизованого захисту компресора докачуючої компресорної станції підземного сховища газу від помпажу / С.Г.Гіренко // Нафтогазова енергетика. – 2008. - №1(6). – С.43-47.

4 Комплексні обстеження надземного механічного технологічного обладнання компресорних станцій магістральних газопроводів: СТП 320.30019801-2022. – Офіційне вид. – К.: ДК «Укртрансгаз». – 2002. – 56 с.

5 Технічне діагностування та контроль технічного стану. Терміни та визначення: ДСТУ 2389-94. [Чинний від 1994-03-17]. – К.: Держстандарт України. – 1994. – 24 с.

6 Визначення вібраційних характеристик. Загальні вимоги: ДСТУ 3160-95. [Чинний від 1995-07-28]. – К.: Держстандарт України. – 1995. – 11 с.

7 Визначення вібраційних характеристик відцентрових компресорів та норми вібрації: ДСТУ 3160-95. [Чинний від 1995-07-28]. – К.: Держстандарт України. – 1995. – 18 с.

8 Гіренко С.Г. Функції автоматизованої системи антипомпажного захисту та регулювання газоперекачувальних агрегатів на докачуючих компресорних станціях підземних сховищ газу / С.Г.Гіренко // Нафтогазова енергетика. – 2007. - №4(5). – С.43-46.

9 Проектирование датчиков для измерения механических величин; под ред Е.П.Осадчего / М.: Машиностроение. – 1976. – 480 с.

10 Сабатин В.Р. Система контроля режимов работы горелок энергетических котлов / [В.Р.Сабатин, Н.И.Смирнов, М.А.Болгов и др.], В.И. Дорошин, В.И.Костык, А.В.Гарянин, В.И.Ногин // Теория и практика построения и функционирования АСУТП. Сборник научных трудов МЭИ. – М.: Изд.МЭИ. – 1998. – С.113-119.

11 Исакович Р.Я. Технологические измерения и приборы / Р.Я.Исакович // М.: Недра. – 1999. – 344 с.

12 Танатар А.И. Элементы промышленной автоматизации и их динамические свойства / А.И.Танатар // К.: Техніка, 1975. – 232 с.

13 Нормы вибрации. Оценка интенсивности вибрации газоперекачивающих агрегатов в условиях эксплуатации на компрессорных станциях министерства газовой промышленности. – М.: Мингазпром, 1983. – 20 с.

14 Карман А. Контроль вибрации оборудования / А.Карман, А.Кошмяко, А.Троцкий // Мир автоматизации. - 2007. – август. - С.50-52.

*Стаття надійшла до редакційної колегії  
04.03.10  
Рекомендована до друку професором  
Г.Н. Семенцовим*