

УДК 681.513.52:622.691.4

# РОЗВИТОК ІНФОРМАЦІЙНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ СИСТЕМИ АВТОМАТИЧНОГО АНТИПОМПАЖНОГО ЗАХИСТУ ТА РЕГУЛЮВАННЯ ГАЗОПЕРЕКА- ЧУВАЛЬНОГО АГРЕГАТУ

Г. Н. Семенов

Доктор технічних наук, професор\*

E-mail: kafatp@ukr.net

Л. І. Давиденко

Аспірантка\*

E-mail: lida\_davydenko@yahoo.com

\*Кафедра автоматизації технологічних процесів і моніторингу в екології Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу вул. Карпатська 15, м. Івано-Франківськ, Україна, 76019

*У статті розкрито сутність та доцільність подальшого розвитку інформаційного забезпечення системи автоматичного антипомпажного захисту та регулювання газоперекачувальних агрегатів дотискувальної компресорної станції підземного сховища газу на основі покращення швидкодії існуючих систем антипомпажного регулювання, шляхом застосування методу злиття даних. Проаналізовано статистичні характеристики такого інформативного показника як ступінь підвищення тиску газу*

*Ключові слова: автоматизація, помпаж, система, регулювання, компресор, забезпечення, оцінки, характеристики, фільтр*

*В статті раскрыта сущность и целесообразность дальнейшего развития информационного обеспечения системы автоматической антипомпажной защиты и регулирования газоперекачивающих агрегатов дожимной компрессорной станции подземного хранилища газа на основе улучшения быстродействия существующих систем антипомпажного регулирования, путем применения метода слияния данных. Проанализированы статистические характеристики такого информативного показателя как степень повышения давления газа*

*Ключевые слова: автоматизация, помпаж, система, регулирование, компрессор, обеспечение, оценки, характеристики, фильтр*

## 1. Вступ

В Україні здійснюються заходи із модернізації газотранспортної системи (ГТС). Уже вдалося досягти певних позитивних результатів. Однак збільшення рівня автоматизації ГТС, зокрема компресорних станцій (КС) не супроводжується підвищенням швидкодії і надійності автоматичного антипомпажного регулювання і захисту газоперекачувальних агрегатів (ГПА) КС, особливо дотискувальних компресорних станцій (ДКС) підземних сховищ газу (ПСГ). Це обумовлює необхідність пошуку шляхів найновішої реалізації можливостей систем антипомпажного регулювання і захисту ГПА від помпажу. В Україні на ДКС ПСГ "Більче-Волиця" створена і експлуатується САК ГПА №9 Ц-16, яка дає змогу реалізовувати складні задачі автоматичного керування і захисту.

Водночас, з наукової точки зору, процес керування ГПА спирається на низку принципів, а з практичної – передбачає застосування відповідних новітніх методів. За умови, що об'єкт керування є надзвичайно важливим, для керування ним повинні використовуватися

новітні принципи та методи і при цьому забезпечувати високу надійність і ефективність.

## 2. Аналіз літературних даних та постановка проблеми

Дослідження із захисту компресорів від помпажу проводили багато зарубіжних вчених [1, 2] – Downer, I. R. Baher, E. O. King, I. F. Kuhlberg, H. Pearson, D. E. Sheppard та ін. У вітчизняній науці представлено обмежене коло робіт, присвячених захисту компресорів від помпажу. У цьому напрямку працюють Ю. Є. Бляут, М. В. Беккер, С. Г. Гіренко [3], М. О. Петеш, А. Ф. Репета, О. В. Сукач, Р. Я. Шимко, які створили акустичний спосіб контролю передпомпажного стану ВН [4]. Ними також створено спосіб захисту компресора від помпажу на основі використання швидкодіючого антипомпажного клапана [5]. Сучасні системи антипомпажного захисту та регулювання пов'язані з дослідженням багатьох параметрів, які описують явище помпажу. Останнім часом набули поширення методи злиття даних серед методів, призначених для

опрацювання інформації у різних галузях. Вони були висвітлені багатьма зарубіжними вченими, такими як: Varshney P. K. [6], Vyington C. S., Garga K. [7], Xiaofeng Liu [8] та іншими.

Проте, аналіз літературних джерел свідчить про недостатній об'єм проведених досліджень у напрямку покращення існуючих систем антипомпажного захисту та регулювання. Сучасний спосіб захисту компресора від помпажу, включає вимірювання параметрів, які характеризують робочий режим компресора, тому застосування новітніх методів для аналізу даних можуть покращити швидкість та надійність існуючих систем антипомпажного регулювання.

За допомогою методу злиття даних можна створити удосконалену модель або систему з набором даних від незалежних джерел. Технологія злиття здатна впоратися з проблемою неповноти, різномірності інформації та невизначеності [9].

Найбільш поширеними методами злиття даних є злиття ваг, метод Демпстера-Шафера, штучні нейронні мережі, фільтр Калмана та нечіткий інтеграл, метод діаграм Ойнера-Вейча-Карно. Технологія злиття даних охоплює всю доступну інформацію про досліджуваний процес, тому важливим є здійснити детальний аналіз даних отриманих внаслідок експерименту, зокрема оцінити статистичні характеристики випадкового процесу.

Одним з важливих параметрів, який характеризує робочий режим компресора, є ступінь підвищення тиску  $E$ , який показує співвідношення тиску газу на виході  $p_{вих}$  нагнітача до тиску газу на вході  $p_{вх}$  нагнітача, тобто  $E = p_{вих} / p_{вх}$ . При нормальній роботі агрегату значення завжди більше 1. Для експериментальної оцінки статистичних характеристик ступеня підвищення тиску використовуємо дані, які отримані на ГПА №9 ДКС ПСГ "Більче-Волиця".

### 3. Мета і задачі дослідження

Метою даної роботи є дослідження статистичних характеристик ступеня підвищення тиску газу як найбільш важливого інформативного параметра в системі автоматичного керування ГПА ДКС ПСГ.

Задачами дослідження є створення узагальноної функціональної структури системи антипомпажного регулювання та захисту ВН ГПА, дослідження статистичних характеристик ступеня підвищення тиску газу, закону розподілу, автокореляційної функції, АФХ формуючого фільтра.

### 4. Експериментальна оцінка статистичних характеристик випадкового процесу

Система автоматичного керування ГПА Ц-16 функціонує у взаємодії з системою керування подачею палива, швидкодіючим антипомпажним клапаном "Моквелд", який встановлений на вихідному колекторі об'язки нагнітача та призначений для антипом-

пажного регулювання та захисту цього нагнітача при наближенні до помпажних явищ.

Режими роботи ГПА Ц-16 ДКС "Більче-Волиця":

- автоматичний пуск (АП);
- режим компримування газу (РКГ);
- холодна прокрутка (ХП);
- режим нормального зупину (НЗ);
- режим аварійного зупину із стравлюванням газу з нагнітача (А31);
- режим аварійного зупину без стравлюванням газу з нагнітача (А32).

На рис. 1 прийняті такі позначення:

$u(t)$  – змінні, що діють на вході ВН ГПА (керувальні дії):  $N_{ст}(t)$  – частота обертання силової турбіни, пол. ДГ – положення дозатора газу,  $p_{вх}(t)$  – тиск газу на вході в нагнітач,  $Q_{вх}(t)$  – об'єм газу на вході;

$f(t)$  – неперервні зовнішні зміни:  $z_{зовн}(t)$  – задана оператором частота обертання ротора нагнітача,  $k_{помп}$  – коефіцієнт помпажу;

$x(t)$  – компонентивектора вихідних змінних:  $Q_{пр}(t)$  – продуктивність нагнітача;  $p_{вих}(t)$  – тиск газу на виході нагнітача,  $Q_{рец}(t)$  – витрата рециркуляції,  $E = p_{вих} / p_{вх}$ ;

$z(t)$  – зовнішні збурення: хімічний стан реального транспортного газу, технічний стан ВН, температура навколишнього середовища, атмосферний тиск та ін.;

$e(t) = x_3(t) - x(t)$  – відхилення (похибка).

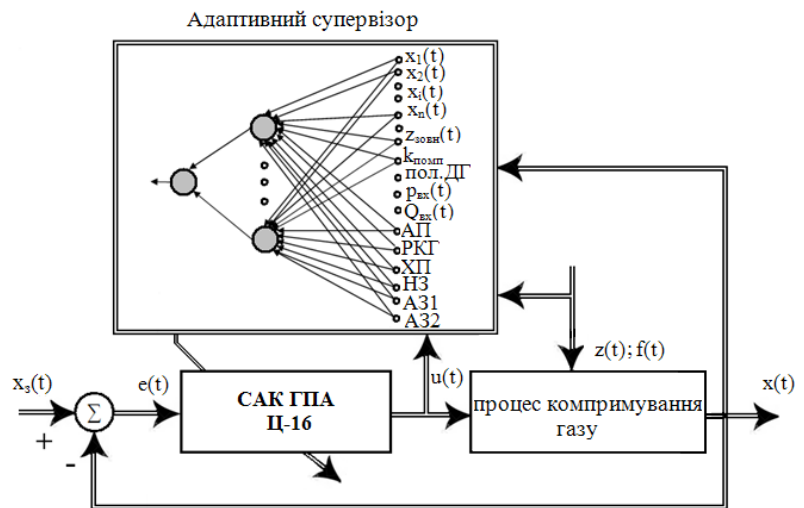


Рис. 1. Узагальнена функціональна структура системи антипомпажного регулювання та захисту ВН ГПА

Дослідження проведено на ГПА №9 ДКС ПСГ "Більче-Волиця".

Графік зміни ступеня підвищення тиску газу в часі  $E(t)$  (рис. 2), отримано з використанням програми для оцифрування Graph2Digit, що дало змогу отримати масив даних  $n=320$  точок.

У табл. 1 наведено математичне сподівання, дисперсія та інші характеристики вибірки даних, а також кількість та ширина інтервалів групування за формулою Стерджеса, які визначені за допомогою середовища Mathcad та відповідних операторів.

Отримавши значення кількості та ширини інтервалів будуюмо гістограму розподілу (рис. 3), скориставшись програмою MatLab та функцією hist, яка підраховує кількість попадань значень в задані інтервали [9].

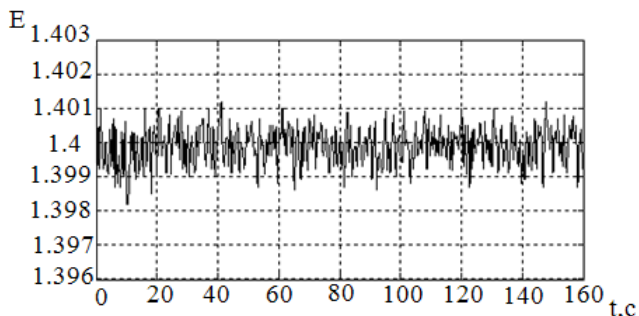


Рис. 2. Графік зміни ступеня підвищення тиску газу в часі

Таблиця 1

Статистичні характеристики вибірки даних для ступеня підвищення тиску газу

№	Статистична характеристика	Формула	Значення
1	Розмах вибірки	$R = x_{max} - x_{min}$	0.003
2	Середнє арифметичне	$x_{mean} = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n X_j$	1.4
3	Середнє геометричне	$g_{mean} = \sqrt[n]{\prod_{i=1}^n X_i}$	1.4
4	Середнє гармонічне	$h_{mean} = \left( \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n \frac{1}{X_j} \right)^{-1}$	1.4
5	Дисперсія: заміщена оцінка;	$\frac{1}{n} \sum_{s=1}^n (X_j - x_{mean})^2$	$3.86 \times 10^{-7}$
	не заміщена оцінка.	$\frac{1}{n-1} \sum_{s=1}^n (X_j - x_{mean})^2$	$3.86 \times 10^{-7}$
6	Середньоквадратичне відхилення: заміщена оцінка;	$stdev(X)$	$6.213 \times 10^{-4}$
	не заміщена оцінка.	$Stdev(X)$	$6.223 \times 10^{-4}$
7	Медіана	$median(X)$	1.4
8	Мода	$mode(X)$	1.401
9	Екссес	$kurt(X)$	-0.729
10	Асиметрія	$skew(X)$	-0.223
11	Кількість інтервалів за формулою Стерджеса	$k = 1 + 3.322 \log(n)$	9.318
12	Ширина інтервалу	$h = \frac{R}{k}$	$3.2 \times 10^{-4}$

Для вибору теоретичного закону розподілу потрібно порівняти отримані гістограми з графіками законів розподілу. Для того щоб, максимально точно підібрати закон розподілу будемо емпіричну та теоретичну щільність розподілу (рис. 4).

Підбір параметрів розподілів проведено із застосуванням принципу максимуму правдоподібності.

- Отримано параметри різних розподілів:
- розподіл гамбела:  $\mu=1.4$ ;  $\sigma=0.0006$ ;
- експоненційний розподіл:  $\mu=1.3999$ ;

- гамма-розподіл:  $a=5076099.305$ ;  $b=0.0000003$ ;
- логнормальний розподіл:  $\mu=0.336$ ;  $\sigma=0.0004$ ;
- нормальний розподіл:  $\mu=1.399$ ;  $\sigma=0.0006$ ;
- розподіл релея:  $b=0.989$ ;
- рівномірний розподіл:  $a=1.3982$ ;  $b=1.401$ ;
- розподіл вейбулла:  $a=1.4002$ ;  $b=2537.955$ .

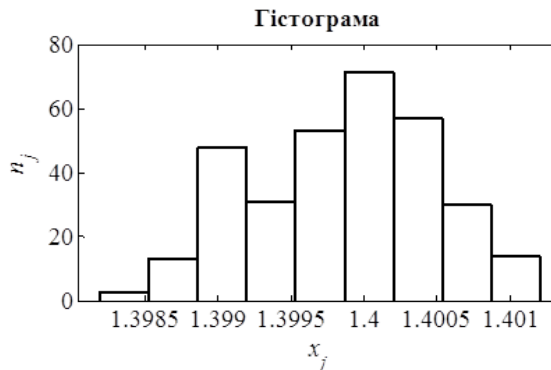


Рис. 3. Гістограма розподілу для ступеня підвищення тиску газу

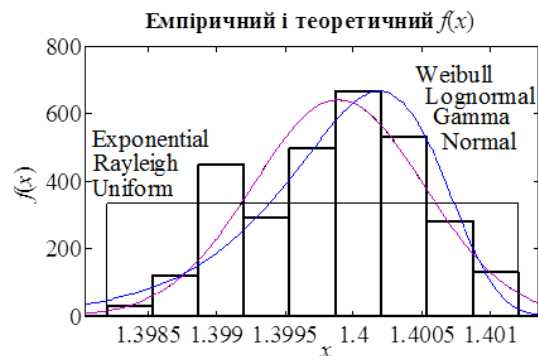


Рис. 4. Емпірична та теоретична щільність розподілу для ступеня підвищення тиску газу

Важливим етапом вибору закону розподілу є перевірка правильності вибору. Для цього застосовуємо критерій узгодженості Колмогорова, в якому використовується максимальна по модулю різниця між теоретичною та емпіричною функціями розподілу (рис. 5).

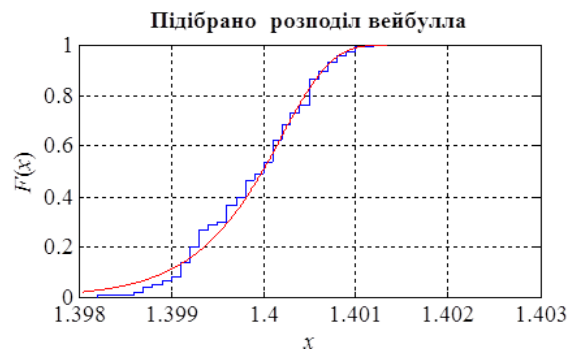


Рис. 5. Емпірична та теоретична функція розподілу для ступеня підвищення тиску газу

Найкраще підходить розподіл вейбулла, критичний рівень значимості для якого 0.00484.

Для визначення нормованої автокореляційної функції скористаємось пакетом Matlab (рис. 6):

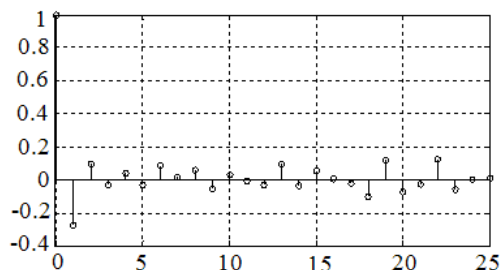


Рис. 6. Графік нормованої автокореляційної функції для ступеня підвищення тиску газу

Графік отриманої нормованої автокореляційної функції підтверджує, що досліджуваний процес є стаціонарним і ергодичним.

Для одержання рівняння автокореляційної функції скористаємось програмою Curve Expert (рис. 7).

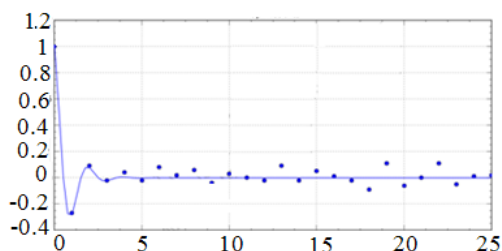


Рис. 7. Рівняння автокореляційної функції для ступеня підвищення тиску газу  $R_{EE}(\tau)$

Графік відтворює вище наведену автокореляційну функцію з коефіцієнтом кореляції  $r=0,969$  і стандартною похибкою  $S=0,052$ .

Отже, рівняння автокореляційної функції наступне:

$$R_{EE}(\tau) = e^{-1.272\tau} \cos(3.142\tau). \quad (1)$$

Використаємо програмний пакет Matlab для визначення спектральної густини (рис. 8):

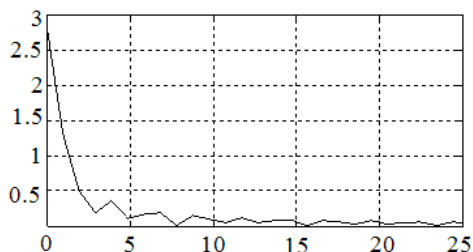


Рис. 8. Графік спектральної густини для ступеня підвищення тиску газу

При дослідженні автоматичних систем виникає необхідність створювати типові випадкові впливи штучно – за допомогою спеціальних генераторів. Найпростіше ця задача вирішується з використанням

формуючого фільтра. Суть методу полягає в тому, що потрібний випадковий сигнал отримується шляхом пропускання білого шуму через фільтр з відповідною частотною характеристикою.

Частотна передавальна функція фільтра зв'язана з спектральною  $W_{\Phi}(j\omega)$  густиною  $S(\omega)$  формуючого сигналу наступним співвідношенням [10]:

$$\{W_{\Phi}(j\omega)\}^2 = S(\omega). \quad (2)$$

Для сигналу з експоненціально-косинусною кореляційною функцією маємо:

$$S(\omega) = \sqrt{2Da} \frac{j\omega + \sqrt{a^2 + b^2}}{(j\omega + a)^2 + b^2} \sqrt{2Da} \frac{-j\omega + \sqrt{a^2 + b^2}}{(-j\omega + a)^2 + b^2}, \quad (3)$$

де  $a, b$  – параметри рівняння автокореляційної функції;  $D$  – дисперсія.

Частотна передавальна функція формуючого фільтру ступеня підвищення тиску газу має наступний вигляд:

$$W_{\Phi}(j\omega) = \sqrt{2Da} \frac{j\omega + \sqrt{a^2 + b^2}}{(j\omega + a)^2 + b^2} \quad (4)$$

або

$$W_{\Phi}(j\omega) = 0.0007 \frac{j\omega + 3.39}{(j\omega + 1.272)^2 + 9.87}. \quad (5)$$

АФХ формуючого фільтру для ступеня підвищення тиску газу наведено на рис. 9.

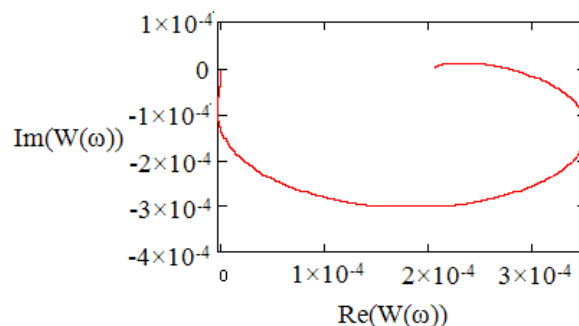


Рис. 9. АФХ формуючого фільтру для ступеня підвищення тиску газу

Визначено, що для дослідження системи автоматичного керування ГПА можна використовувати формуючий фільтр з амплітудно-фазовою характеристикою, яка визначена на основі отриманих автокореляційної функції і спектральної густини для ступеня підвищення тиску газу.

## 5. Висновок

На основі результатів експериментальних досліджень статистичних характеристик ступеня підвищення

тиску газу, який є одним з основних факторів, що характеризує роботу відцентрового нагнітача газоперекачувальних агрегатів дотискувальної компресорної станції підземного сховища газу “Більче-Волиця”, визначено такі характеристики сигналу як гістограма, емпірична та теоретична щільність розподілу, закон розподілу, емпірична та теоретична функції розподілу, нормована

автокореляційна функція, спектральна густина, що дозволило визначити амплітудно-фазову характеристику формуючого фільтру. Проведений аналіз показав, що процес є стаціонарним ергодичним випадковим процесом, який підпорядковується закону розподілу вейбулла, а рівняння автокореляційної функції має дві складові: експоненціальну та косинусоїдальну.

---

#### Література

1. Бляут, Ю. Є. Автоматична ідентифікація помпажних характеристик газоперекачувальних агрегатів з газотурбінним приводом для ефективного регулювання [Текст]: автореф. дис.... канд. тех. наук: 05.13.07 / Ю. Є. Бляут // Івано-Франківський нац. тех. ун-т нафти і газу. – Івано-Франківськ, 2013. – 20 с.
2. Семенцов, Г. Н. Синтез одноконтурної системи автоматичного захисту компресора від помпажу [Текст] / Г. Н. Семенцов // Науковий журнал «Технологічні комплекси». – 2010. – № 2. – С. 137–151.
3. Гіренко, С. Г. Автоматичне антипомпажне регулювання відцентрового нагнітача дотискувальної компресорної станції [Текст]: автореф. дис.... канд. тех. наук: 05.13.07 / С. Г. Гіренко // Івано-Франківський нац. тех. ун-т нафти і газу. – Івано-Франківськ, 2010. – 20 с.
4. Патент 91465 Україна. Акустичний спосіб контролю передпوماжного стану відцентрового нагнітача [Текст] / Сукач О. В., Бляут Ю. Є., Беккер М. В., Репета А. Ф., Семенцов Г. Н., Гіренко С. Г., Шимко Р. Я., Петеш М. О. – №а200907520; заявл.17.07.2009; опубл.26.07.2010, Бюл. № 14. – 4 с.
5. 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; заявл. 09.06.2008; опубл. 11.01.2010, Бюл. № 1. – 6 с.
6. Varshney, P. K. Distributed detection and data fusion [Text] / P. K. Varshney. – New York, NY: Springer-Verlag New York Inc., 1996. – 288 p. doi 10.1007/978-1-4612-1904-0
7. 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.
8. Liu, X. Machinery Fault Diagnostics Based on Fuzzy Measure and Fuzzy Integral Data Fusion Techniques [Text] / X. Liu, L. Ma. – School of Engineering Systems, 2005. – 220 p. doi: 10.1016/j.ymsp.2008.07.012
9. Иглин, С. П. Теория вероятностей и математическая статистика на базе MatLab [Текст] / С. П. Иглин. – Харьков: НТУ «ХПИ», 2006. – 612 с.
10. Семенцов, Г. Н. Теорія автоматичного керування [Текст] / Г. Н. Семенцов // Івано-Франківськ: ІФНТУНГ, 1999. – 610 с.