

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНА ОЦІНКА ЗАКОНІВ РОЗПОДІЛУ ВИПАДКОВИХ ПРОЦЕСІВ У СИСТЕМІ АВТОМАТИЧНОГО КЕРУВАННЯ ГАЗОПЕРЕКАЧУВАЛЬНИМ АГРЕГАТОМ ДОТИСКУВАЛЬНОЇ КОМПРЕСОРНОЇ СТАНЦІЇ ПІДЗЕМНОГО СХОВИЩА ГАЗУ

Л.І. Давиденко

ІФНТУНГ; 76019, м.Івано-Франківськ, вул. Карпатська, 15,
e-mail: lida_davydenko@yahoo.com

Розглядається актуальна науково-практична задача, що полягає у виборі законів розподілу випадкових процесів у системі автоматичного керування газоперекачувальним агрегатом дотискувальної компресорної станції підземного сховища газу. Для вирішення цієї задачі використано експериментальні дані, що відображають параметри, які характеризують явище помпажу у відцентровому нагнітачі, а саме 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. Для побудови гістограми, теоретичної та емпіричної щільності розподілу, закону розподілу, емпіричної та теоретичної функції розподілу скористалися програмним пакетом MatLab. Проаналізовано отримані результати за допомогою критерію узгодженості та здійснено оцінку відповідних законів розподілу.

Ключові слова: закон розподілу, функція розподілу, помпаж, відцентровий нагнітач, система автоматичного керування.

Рассматривается актуальная научно-практическая задача, заключающаяся в выборе законов распределения случайных процессов в системе автоматического управления газоперекачивающим агрегатом дожимной компрессорной станции подземного хранилища газа. Для решения этой задачи использованы экспериментальные данные, отражающие параметры, характеризующие явление помпажа в центробежном нагнетателе, а именно перепад давления на сужающем устройстве перед нагнетателем, скорость вращения силовой турбины, горизонтальную вибрацию передней опоры нагнетателя, вертикальную вибрацию передней опоры нагнетателя, горизонтальную вибрацию задней опоры нагнетателя, вертикальную вибрацию задней опоры нагнетателя, степень повышения давления. Для построения гистограммы, теоретической и эмпирической плотности распределения воспользовались программным пакетом MatLab. Проанализированы полученные результаты с помощью критерия согласованности и осуществлена оценка соответствующих законов распределения.

Ключевые слова: закон распределения, функция распределения, помпаж, центробежный нагнетатель, система автоматического управления.

We considered the relevant scientific and practical problem, that is to choose the laws of random processes distribution in the automatic control system of gas pumping units in boosting compressor stations in underground gas storage facility. To resolve this problem we used the experimental data that reflect the parameters which characterize the surge phenomenon in the centrifugal superchargers, such as pressure drop on the narrowing device before the supercharger, the rotation speed of the power turbine, horizontal vibration of the supercharger front support, vertical vibration of the supercharger front support, horizontal vibration of the supercharger back support, vertical vibration of the supercharger back support, pressure ratio. We used the MatLab software package to construct a histogram, theoretical and empirical density distribution. The obtained results were analysed using the equality test and the estimation of the relevant distribution laws was carried out.

Keywords: distribution law, distribution function, surge, centrifugal superchargers, automatic control system.

Вступ

Задача покращення швидкодії та надійності існуючих систем автоматичного керування газоперекачувальним агрегатом (ГПА) дотискувальної компресорної станції (ДКС) підземного сховища газу (ПСГ) є актуальною підзадачею загальної проблеми оптимального керування компресорними станціями, які повинні забезпечувати високу надійність функціонування єдиної системи газопостачання України [1].

Газодинамічна стійкість роботи відцентрових нагнітачів (ВН) ГПА – одна з головних умов їх надійності. Режим нестійкості, який

отримав назву “помпаж”, викликає інтенсивні коливання газу в системі, здатні призвести до аварії або значного зниження їх надійності [2]. Під час виникнення помпажу нагнітач та двигун можуть отримати пошкодження, несумісні з їх подальшою експлуатацією, а їх відновлення або ремонт потребуватимуть значних грошових витрат [3]. Відомі способи захисту ВН від помпажу нерозривно пов’язані з опрацюванням в реальному часі великої кількості контрольованих параметрів, тому доцільно здійснити аналіз цих даних в контексті вивчення їх статистичних характеристик.

Аналіз стану досліджень та публікацій

Питання захисту компресорів від помпажу і антипомпажного регулювання розкриваються в роботах науковців з України та країн пострадянського простору – Ю.Д. Акульшина, В.Г. Веселовського, О.В. Городецького, В.М. Гуренка, В.В. Казакевича, Р.Г. Караджі [1] та ін. Водночас, проблемам вивчення статистичних характеристик випадкових процесів у системах автоматичного керування газоперекачувальними агрегатами приділяється недостатньо уваги. Проблема захисту компресорів від помпажу присвячено чимало праць західних учених. Серед них слід виокремити Т. Downer, I.R. Baher, E.O. King, I.F. Kuhlberg, H. Pearson, D.E. Shepperd [1,2]. 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, М.О. Петеш, А.Ф. Репета, Г.Н.Семенцов, О.В. Сукач, Р.Я. Шимко [1,3,4,5,6] та ін.

Аналітичний огляд робіт вітчизняних вчених, пов'язаних з дослідженням проблем захисту компресорів від помпажу, показав, що у розробках та реалізаціях систем автоматичного керування ГПА досягнуто позитивних результатів [1–6]. Сучасні системи антипомпажного захисту та регулювання пов'язанні з дослідженням багатьох параметрів, які описують явище помпажу. Розвиток сучасних інформаційних технологій дає змогу покращити існуючі системи керування ГПА, проте необхідно детально опрацювати усі доступні дані.

Виділення невирішених частин

Аналіз літературних джерел [1–7 та ін.] свідчить про недостатній об'єм проведених досліджень у напрямку покращення існуючих способів антипомпажного захисту та регулювання. Проте істотно бракує знань щодо реалізації систем антипомпажного захисту – малодослідженими залишаються статистичні характеристики випадкових процесів у системах автоматичного керування газоперекачувальними агрегатами. Отже, необхідно здійснити аналіз інформативних параметрів, які пов'язані з явищем помпажу у ВН за допомогою статистичних методів, для подальшого їх використання.

Формування цілі

Мета статті – дослідити статистичні властивості випадкових процесів в системі автоматичного керування газоперекачувальним агрегатом дотискувальної компресорної станції підземного сховища газу на основі експериментальних даних.

Виклад основного матеріалу

Аналіз роботи ГПА №9 типу Ц-6,3 з газотурбінним приводом Д-336-2 ДКС ПСГ “Більче-Волиця” дозволив вибрати чинники, які суттєво впливають на процес формування помпажу, і поділити їх на три групи:

– змінні, що діють на вході ВН ГПА: частота обертання силової турбіни $N_{cr}(t)$, поло-

ження дозатора газу, тиск газу на вході нагнітача $P_{вх}(t)$ та об'єм газу на вході $Q_{вх}(t)$;

– некеровані зовнішні впливи: задана оператором частота обертання ротора нагнітача, коефіцієнт помпажу $K_{помп}$, які характеризують умови роботи ВН ГПА;

– показники роботи ГПА $\bar{x}(t)$, які вважаємо компонентами вектора вихідних змінних

$$\bar{x}^T(t) = [Q_{пр}(t), P_{вих}(t), E(t), Q_{рец}(t)],$$

$$E = P_{вих} / P_{вх};$$

де $Q_{рец}(t)$ – витрата рециркуляції;

$Q_{пр}(t)$ – продуктивність нагнітача;

$P_{вих}(t)$ – тиск газу на виході нагнітача.

Кожна із вихідних величин є функцією керувальних дій $u(t)$, та зовнішніх впливів f , які характеризують взаємодію об'єкта з навколишнім середовищем

$$\bar{x}_j = \varphi_j(\bar{u}(t), \bar{f}(t)), \quad j = 1, 2, \dots, n,$$

де n – кількість вихідних величин.

Внаслідок дії на ВН ГПА таких збурень, як технічний стан ВН, хімічний стан реального транспортованого газу, температура навколишнього середовища, атмосферний тиск та ін., вхідні та вихідні величини ВН ГПА вимірюються з певними похибками, які можна трактувати як адитивні шуми. Отже, досліджуваний процес компримування газу описується сукупністю випадкових процесів, які стохастично пов'язані між собою.

Відзначимо, що під час визначення статистичних характеристик випадкового процесу необхідно віднести його до певного класу випадкових процесів, тобто побудувати його математичну модель. Така модель є певною ідеалізацією реального процесу. Очевидно, будь-якому реальному процесу відповідає множина моделей. Тому вибір конкретної моделі залежить від задачі, в якій використовуються характеристики досліджуваного випадкового процесу. Для задач автоматичного керування найбільш важливими є такі властивості випадкового процесу, як стаціонарність, тип розподілу, диференційованість, ергодичність тощо.

Специфіка задач антипомпажного регулювання і захисту відцентрових нагнітачів від помпажу (індивідуальність характеристик ВН, мала кількість ГПА, різні умови їх роботи) в умовах ДКС ПСГ виключає осереднення результатів статистичного експерименту по множині, залишаючи один шлях аналізу статистичних характеристик – по одній реалізації кінцевої довжини.

Нами розглядаються синхронні реалізації кінцевої довжини для досліджуваних параметрів, тривалість яких 200 секунд.

Система захисту компресора від помпажу, включає вимірювання параметрів, які характеризують робочий режим компресора [6]. Відповідними давачами вимірюють перепад тиску на звужуючому пристрої перед нагнітачем, швидкість обертання силової турбіни, горизонтальну вібрацію передньої опори нагнітача, вертикальну вібрацію передньої опори нагнітача, гори-

Таблиця 1 – Таблиця давачів системи контролю ГПА № 9 ДКС ПСГ “Більче-Волиця”

№	Найменування	Одиниця вимірювання	Означення	Пояснення до параметру
1	dP_konph	кгс/см ²	Перепад тиску на конфузорі	Перепад тиску на звужуючому пристрої за нагнітачем. Характеризує (непрямо) витрату газу через нагнітач. Бере участь у формулі для розрахунку Кромпраг. Чим ближче значення параметру до «0», тим менша витрата газу через нагнітач. При абсолютному «0» витрата газу через нагнітач дорівнює нулю.
2	E	Абсолютне значення	Ступінь підвищення тиску	Значення вказує на співвідношення тиску газу на виході $P_{вих}$ нагнітача до тиску газу на вході $P_{вх}$ нагнітача $E = P_{вих} / P_{вх}$. При нормальній роботі завжди більше 1.
3	Gg_PON	мкм	Вібрація (вібропереміщення) горизонтальне (g) передньої опори нагнітача (PON)	Значення характеризує величину вібрації на вказаних вузлах нагнітача. Вимірюється тарируемими стандартизованими давачами, які закріплені безпосередньо у вказаних точках.
4	Gg_ZON	мкм	Вібрація (вібропереміщення) горизонтальне (g) задньої опори нагнітача (ZON)	Те саме
5	Gv_PON	мкм	Вібрація (вібропереміщення) вертикальне (v) передньої опори нагнітача (PON)	Те саме
6	Кромпраг	Абсолютне значення	Коефіцієнт –запас за помпажем	Обчислюється з класичної формули. Значення «0» і робота нагнітача в зоні 0–2 % відповідає початку помпажних явищ. Всі режими роботи нагнітача вище 5 % запасу – вважаються стійкими.
7	N_ст	об/хв.	Частота обертання вільної (силової, вільної) турбіни	Дорівнює частоті обертання нагнітача. Жорстко зв'язана з нагнітачем валом. Вимірюється дубльованими давачами.

зонтальну вібрацію задньої опори нагнітача, вертикальну вібрацію задньої опори нагнітача, ступінь підвищення тиску (таблиця 1).

У зв'язку із великою кількістю інформаційних параметрів виникає потреба у покращенні інформаційного забезпечення системи автоматичного керування, тому актуальним є використання статистичних методів для дослідження даних.

Для вибору закону розподілу випадкових процесів потрібно вибрати кількість та ширину інтервалів, побудувати гістограму, порівняти її з різними розподілами, обрати закон розподілу, який найкраще описує вибірку, та перевірити правильність вибору, застосувавши критерій узгодженості. Для порівняння використовува-

тимемо такі закони розподілу: нормальний, експоненціальний, гамма, логарифмічно нормальний, Релея, рівномірний, Вейбулла, Гамбела.

Для вірної побудови гістограми щільності розподілу важливо обрати оптимальну кількість інтервалів, на які розбиваємо діапазони значень параметрів, тому виберемо правило Стерджеса:

$$k = [1 + 3.322 \lg n],$$

де k – кількість інтервалів;

[] – операція заокруглення до найближчого цілого

n – кількість значень у масиві, $n=400$.

Ширину інтервалів розраховуємо за формулою:

$$d = \frac{(x_{\max} - x_{\min})}{k},$$

де d – ширина інтервалів;
 x_{\max} – максимальне значення сигналу з вибірки;
 x_{\min} – мінімальне значення сигналу з вибірки;
 k – кількість інтервалів.

Провівши розрахунок для кожного параметра, згідно з експериментальними даними кількість інтервалів $k=10$.

Отримавши значення кількості та ширини інтервалів, будуюмо для кожної вибірки гістограми розподілу, скориставшись програмою MatLab та функцією hist, яка підраховує кількість попадань значень в задані інтервали. Для вибору теоретичного закону розподілу потрібно порівняти отримані гістограми з графіками законів розподілу [7]. Для того щоб, максимально точно підібрати закон розподілу, будуюмо емпіричну та теоретичну щільності розподілу (таблиця 2). Вибір теоретичного закону розподілу

залежить від параметрів розподілу. Логнормальний закон розподілу та закон розподілу Вейбулла є двопараметричними розподілами, оскільки залежать від двох параметрів, тому також проведено підбір параметрів розподілів із застосуванням принципу максимуму правдоподібності.

Важливим етапом вибору закону розподілу є перевірка правильності вибору. Для цього застосовуємо критерій узгодженості Колмогорова, в якому використовується максимальна за модулем різниця між теоретичною та емпіричною функціями розподілу (таблиця 2).

За результатами експериментальних досліджень статистичних характеристик випадкових процесів перепаду тиску на конфузори, швидкості обертання силової турбіни, горизонтальної вібрації передньої опори нагнітача, вертикальної вібрації передньої опори нагнітача, горизонтальної вібрації задньої опори нагнітача, вертикальної вібрації задньої опори нагнітача та ступеня підвищення тиску у системі автоматичного керування ГПА виявили їх закони розподілу.

Таблиця 2 – Емпіричні та теоретичні щільності і функції розподілу параметрів ГПА

№	Параметр	Гістограма, емпірична та теоретична щільність розподілу	Закон розподілу	Теоретична та емпірична функції розподілу
1	dP_kon		Логнормальний розподіл $f(x m,y) = \frac{1}{0.008x\sqrt{2p}} e^{-\frac{(\ln x + 1.78)^2}{0.0001}}$ $\mu = \log(m^2 / \sqrt{v + m^2})$ $\sigma = \sqrt{\log(v / m^2 + 1)}$ m – математичне сподівання; v – дисперсія. $\mu = -1.78; \sigma = 0.008.$	
2	E		Розподіл Вейбулла $f(x a,b) = 166388 \left(\frac{x}{1.4}\right)^{232843} e^{-\left(\frac{x}{1.4}\right)^{232943}}$ a – коефіцієнт масштабу, $a > 0$, b – коефіцієнт форми, $b > 0$. $a = 1.4$; $b = 2329.43.$	
3	Gg_P		Логнормальний розподіл $f(x m,y) = \frac{1}{0.02x\sqrt{2p}} e^{-\frac{(\ln x - 3.93)^2}{0.0008}}$ $\mu = 3.93; \sigma = 0.02.$	

Продовження таблиці 2

№	Параметр	Гістограма, емпірична та теоретична щільність розподілу	Закон розподілу	Теоретична та емпірична функції розподілу
4	Gg_Z		Логнормальний розподіл $f(x m,y) = \frac{1}{0.03x\sqrt{2p}} e^{-\frac{(\ln x - 2.96)^2}{0.0018}}$ $\mu = 2.96;$ $\sigma = 0.03;$	
5	Gv_P		Логнормальний розподіл $f(x m,y) = \frac{1}{0.03x\sqrt{2p}} e^{-\frac{(\ln x - 3.65)^2}{0.0018}}$ $\mu = 3.65;$ $\sigma = 0.03;$	
6	Кром-раг		Логнормальний розподіл $f(x m,y) = \frac{1}{0.014x\sqrt{2p}} e^{-\frac{(\ln x - 3.63)^2}{0.0004}}$ $\mu = 3.63;$ $\sigma = 0.014.$	
7	N_ст		Логнормальний розподіл $f(x m,y) = \frac{1}{0.0004x\sqrt{2p}} e^{-\frac{(\ln x - 8.52)^2}{0.00000032}}$ $\mu = 8.52;$ $\sigma = 0.0004.$	

Висновки

За результатами досліджень статистичних характеристик основних факторів, що характеризують роботу відцентрового нагнітача газоперекачувального агрегату дотискувальної компресорної станції “Більче-Волиця” визначено такі характеристики сигналів, як гістограма, емпірична та теоретична щільність розподілу, закон розподілу, емпірична та теоретична функції розподілу тощо, що дало змогу обґрунтува-

ти доцільність використання логнормального закону розподілу для шести досліджуваних параметрів і використовувати їх для вирішення задач захисту від помпажу і антипомпажного регулювання.

Література

1 Гіренко С.Г. Автоматичне антипомпажне регулювання відцентрового нагнітача дотискувальної компресорної станції: автореферат ди-

сертації на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук: 05.13.07 / Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу. – Івано-Франківськ, 2010. – 20 с.

2 Бляут Ю.Є. Автоматична ідентифікація помпажних характеристик газоперекачувальних агрегатів з газотурбінним приводом для ефективного регулювання: автореферат дисертації на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук: 05.13.07 / Юрій Євстахович Бляут; Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу. – Івано-Франківськ, 2013. – 20 с.

3 Пат. 91465 Україна. Акустичний спосіб контролю передпوماжного стану відцентрового нагнітача / 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.

4 Семенцов Г.Н. Синтез однокатної системи автоматичного захисту компресора від помпажу / Г.Н. Семенцов // Технологічні комплекси. – 2010. – №2. – С. 137–151.

5 Пат. 52128А Україна. Спосіб захисту компресора від помпажу / Гіренко С.Г., Спіченков Ю.М., Бобков В.Ю. - №2002021583; заявл.26.02.2002; опубл.16.12.2002, Бюл.№12. – 3 с.

6 Пат. 89302 Україна. Спосіб захисту компресора від помпажу / 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.

7 Иглин С.П. Теория вероятностей и математическая статистика на базе MatLab / С.П. Иглин. – Харьков: НТУ "ХПИ", 2006. – 612 с.

*Стаття надійшла до редакційної колегії
11.05.14*

*Рекомендована до друку
професором Семенцовим Г.Н.
(ІФНТУНГ, м. Івано-Франківськ)
канд. техн. наук Воциньським В.С.
(ТОВ СКБЗА, м. Івано-Франківськ)*