

<https://doi.org/10.26565/2079-1747-2026-37-05>

УДК 658.62.018.012

- ¹**ПРОКОПЕНКО О. О.**, кандидат технічних наук,
доцент кафедри автоматизації, метрології та енергоефективних технологій
e-mail: o.o.prokopenko@karazin.ua ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6834-3056>
- ¹**АНТОНЕНКО Н. С.**, кандидат технічних наук,
доцент кафедри автоматизації, метрології та енергоефективних технологій
e-mail: n.s.antonenko@karazin.ua ORCID: <https://orcid.org/0009-0000-0879-1642>
- ²**ТЮПА І.**, кандидат технічних наук,
заступник директора з охорони праці, технічної безпеки та підготовки кадрів
e-mail: igortyupa9@gmail.com ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8705-9122>
- ¹**ХАЛІМОВ Д. В.**,
аспірант кафедри автоматизації, метрології та енергоефективних технологій
e-mail: ovcharovoleksandr1@gmail.com ORCID: <https://orcid.org/0009-0008-0919-8232>
- ¹**ХАЛІМОВ П. В.**,
аспірант кафедри автоматизації, метрології та енергоефективних технологій
e-mail: remontkhalimov@gmail.com ORCID: <https://orcid.org/0009-0006-6484-5872>
- ¹**ЮРЕЧКО Д.О.**, здобувач другого (магістерського) рівня вищої освіти
кафедри автоматизації, метрології та енергоефективних технологій
e-mail: yurechko.dima@gmail.com ORCID: <https://orcid.org/0009-0002-1389-6953>
- ¹Харківський національний університет імені В.Н. Каразіна
майдан Свободи, 4, м. Харків, 61022, Україна.
²КП Харківські теплові мережі
вул. Мефодіївська 11, м. Харків,

СТАТИСТИЧНІ МЕТОДИ НОРМУВАННЯ ВІБРАЦІЇ ГАЗОПЕРЕКАЧУВАЛЬНИХ АГРЕГАТИВ НА ОСНОВІ АНАЛІЗУ ЕКСПЛУАТАЦІЙНИХ ДАНИХ

У роботі запропоновано новий підхід до нормування загального рівня вібрації газоперекачувальних агрегатів (ГПА), що ґрунтується на статистичному аналізі великої вибірки експлуатаційних даних. На відміну від традиційних методів, які спираються на фіксовані нормативи або емпіричні рекомендації міжнародних стандартів, запропонована методика використовує критерій Неймана-Пірсона для визначення оптимального порогового рівня вібрації, що мінімізує ймовірність хибного рішення щодо технічного стану агрегату.

Побудовано математичні моделі розподілу вібраційної швидкості, що враховують як гармонічні складові, так і шумові компоненти спектра. Показано, що для реальних умов експлуатації найбільш адекватним є використання моделі сумарної вібрації як комбінації розподілів Релея з різними дисперсіями. На основі експериментальних даних парку ГПА - 10 (310 агрегатів) визначено статистичні параметри вібрації та розраховано граничні рівні за двома варіантами: через другий момент розподілу та за правилом «трих сигм».

Отримані результати свідчать, що чинні нормативи вібрації значно перевищують статистично обґрунтовані значення, що може призводити до зниження ресурсу агрегатів та підвищення аварійності. Запропонований підхід дозволяє формувати науково обґрунтовані норми вібрації для конкретних точок вимірювання та забезпечує підвищення надійності експлуатації без додаткових витрат.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: віброшвидкість, газоперекачувальний агрегат, статистичне нормування, критерій Неймана-Пірсона, розподіл Релея, надійність, діагностика, спектральний аналіз.

Як цитувати: Прокопенко О. О., Антоненко Н. С., Тюпа І., Халімов Д. В., Халімов П. В., Юречко Д. О. Статистичні методи нормування вібрації газоперекачувальних агрегатів на основі аналізу експлуатаційних даних. Машинобудування. 2026. Вип. 37. С. 64-76. <https://doi.org/10.26565/2079-1747-2026-37-05>



Постановка проблеми та її зв'язок із важливими науковими чи практичними завданнями

Проблематика вібраційного контролю та статистичного нормування технічного стану газоперекачувальних агрегатів активно розвивається впродовж останніх десятиліть. У сучасних дослідженнях значна увага приділяється питанням формування достовірних діагностичних критеріїв, які враховують стохастичну природу вібраційних процесів [9, 13], спектральну структуру сигналів [12, 18] та вплив експлуатаційних факторів [14].

У низці робіт, присвячених аналізу роторних машин та компресорного обладнання, підкреслюється важливість використання статистичних моделей розподілу віброшвидкості, зокрема моделей на основі розподілу Релея, Вейбулла та їхніх комбінацій [13, 19]. Дослідники відзначають, що такі моделі адекватно описують поведінку вібраційних сигналів у реальних умовах експлуатації, де гармонічні складові поєднуються з широкосмуговим шумом [12, 18].

Окремий напрям досліджень стосується порогового нормування. У роботах, присвячених методам технічної діагностики, доведено, що фіксовані нормативи, які не враховують статистичну мінливість параметрів, можуть призводити до хибних рішень - як у бік надмірного технічного обслуговування, так і у бік пропуску небезпечних станів [10, 16]. Тому сучасні підходи орієнтуються на критерії

оптимальності, серед яких особливе місце займає критерій Неймана-Пірсона, що дозволяє мінімізувати ймовірність помилок першого та другого роду [16].

У дослідженнях, присвячених газотранспортному обладнанню, наголошується на необхідності використання великих вибірок експлуатаційних даних для формування надійних статистичних норм [5, 6, 17]. Це пов'язано з тим, що вібраційні характеристики агрегатів одного типу можуть суттєво відрізнятися залежно від умов роботи, ступеня зношування, режимів навантаження та конструктивних особливостей.

Також у сучасній літературі активно розвивається напрям спектрально-статистичного аналізу, який поєднує класичні методи спектральної діагностики з математичними моделями випадкових процесів [12, 18]. Такий підхід дозволяє точніше оцінювати співвідношення між гармонічними та шумовими складовими, визначати параметри «сигнал–шум» [15] та формувати обґрунтовані порогові рівні [10].

Таким чином, аналіз наукових публікацій свідчить про актуальність переходу від нормативів, заснованих на емпіричних рекомендаціях [1, 3, 4], до статистично обґрунтованих методів нормування, що враховують реальні експлуатаційні дані та мінімізують ризики хибних діагностичних рішень [5, 9, 10, 17].

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Забезпечення надійної та безпечної роботи газоперекачувальних агрегатів (ГПА) є одним із ключових завдань сучасних систем газотранспорту. Вібраційний стан агрегатів безпосередньо впливає на їх ресурс, енергоефективність та імовірність виникнення аварійних ситуацій, тому контроль вібрації є невід'ємною складовою технічної діагностики [1, 5, 14]. Традиційні підходи до нормування вібрації, що базувалися на галузевих нормативних документах 1980-х років, не враховують реальних статистичних характеристик експлуатаційних процесів та сучасних вимог до оцінювання технічного стану обладнання [2, 3, 4].

У зв'язку з цим актуальним є застосування методів математичного моделювання та статистичного аналізу для визначення порогових рівнів віброшвидкості, які відповідають фактичним умовам роботи агрегатів [9, 13, 17]. Міжнародні стандарти серії ISO 20816 та їх національні аналоги [7, 8] регламентують сучасні підходи до вимірювання та оцінювання вібрації машин, однак не враховують специфіку вібраційних процесів газоперекачувальних агрегатів у реальних умовах експлуатації [5, 6, 14].

Тому виникає необхідність у розробленні статистично обґрунтованих критеріїв нормування, які базуються на аналізі випадкових та детермінованих

складових вібросигналу, оцінюванні ймовірностей хибних діагностичних рішень [10, 16] та визначенні порогових значень віброшвидкості з урахуванням фактичних експлуатаційних даних [5, 6, 17].

Метою роботи є розроблення статистично обґрунтованого підходу до нормування рівнів віброшвидкості газоперекачувальних агрегатів на основі аналізу великої вибірки експлуатаційних даних. На відміну від традиційних нормативних методик, запропонований підхід передбачає:

- побудову математичних моделей розподілу вібраційних параметрів, що враховують гармонічні та шумові складові сигналу;
- визначення оптимальних порогових рівнів віброшвидкості за критерієм Неймана–Пірсона;

- оцінювання ймовірності хибних діагностичних рішень залежно від вибраного порогу;

- порівняння статистично обґрунтованих норм із чинними нормативами для агрегатів типу ГПА-10;

- формування рекомендацій щодо підвищення надійності та безаварійності експлуатації газотранспортного обладнання.

Досягнення цієї мети дозволяє перейти від емпіричного нормування до науково обґрунтованої системи контролю технічного стану, що базується на реальних даних та мінімізує ризики помилкових рішень.

Виклад основного матеріалу

Чинні нормативи вібрації для газоперекачувальних агрегатів, що застосовуються на компресорних станціях, здебільшого базуються на рекомендаціях міжнародних стандартів ISO та VDI. Ці стандарти визначають граничні рівні віброшвидкості для різних класів машин, але не враховують специфіку газотранспортного обладнання, особливості його конструкторції та реальні експлуатаційні умови.

Порівняння статистично обґрунтованих порогів із чинними нормами показує суттєві розбіжності. Зокрема: статистично розраховані пороги віброшвидкості є нижчими, ніж нормативні значення, що застосовуються на практиці; нормативи ISO/VDI допускають значно вищі рівні вібрації, які для газоперекачувальних агрегатів можуть бути критичними; підвищені нормативи призводять до зменшення ресурсу підшипникових вузлів, збільшення частоти ремонтів та ризику аварійних зупинок; статистичний підхід дозволяє адаптувати пороги до конкретних точок вимірювання, що особливо важливо для агрегатів типу ГПА-10, де вібраційна картина суттєво відрізняється між опорами.

У практиці експлуатації часто спостерігається ситуація, коли агрегат формально відповідає нормативам, але демонструє ознаки деградації. Це пояснюється тим, що нормативи не враховують:

- індивідуальні особливості агрегату;
- накопичення дефектів у часі;
- статистичну мінливість параметрів;
- вплив режимів навантаження.

Статистично обґрунтовані пороги, навпаки, дозволяють: виявляти ранні ознаки дефектів, зменшувати кількість хибних рішень, підвищувати точність діагностики, оптимізувати графіки технічного обслуговування.

Вібраційні процеси в газоперекачувальних агрегатах є результатом взаємодії багатьох фізичних чинників, серед яких домінують динаміка ротора, газодинамічні навантаження, стан підшипникових вузлів та конструктивні особливості агрегату. У реальних умовах вібраційний сигнал має стохастичну природу і може бути поданий як сума детермінованої та випадкової складових:

$$V(t) = V_F(t) + V_{ш}(t), \quad (1)$$

де $V_F(t)$ - гармонічна компонента, пов'язана з обертанням ротора;

$V_{ш}(t)$ - шумова складова, що моделюється випадковим процесом із нульовим середнім значенням.

Гармонічна складова описується виразом:

$$V_F(t) = A \cdot \sin(\omega t + \varphi), \quad (2)$$

де A - амплітуда першої гармоніки,

ω - кутова частота,

φ - початкова фаза.

Шумова складова характеризується дисперсією $\sigma_{ш}^2$, яка визначає рівень випадкових збурень у системі.

У випадку, коли випадкова складова є домінуючою, амплітудний розподіл віброшвидкості описується законом Релея:

$$p(V) = \frac{V}{\sigma^2} \exp\left(-\frac{V^2}{2\sigma^2}\right), \quad (3)$$

Де V - миттєве значення віброшвидкості,

σ - параметр масштабу, пов'язаний із дисперсією шумової складової,

$p(V)$ - щільність ймовірності появи значення V .

Параметр σ визначає середній рівень випадкових коливань і є ключовим для подальшого нормування.

Викладене добре узгоджується з експлуатаційними даними для парку агрегатів у нормальному стані. На рисунку 1 наведено графічну інтерпретацію цього розподілу та визначення порогового рівня V_n .

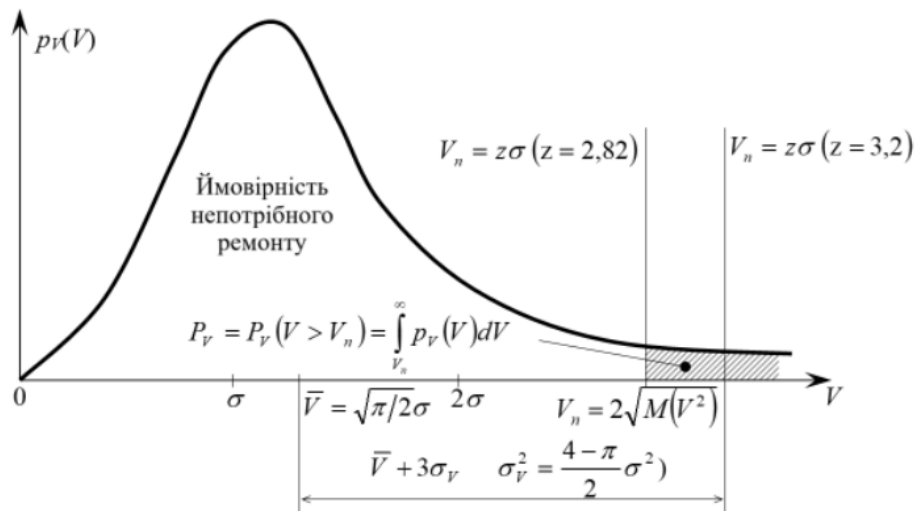


Рис. 1 – Графічне визначення порогового рівня віброшвидкості за законом розподілу Релея для агрегатів у нормальному технічному стані

Fig. 1 – Graphical determination of the threshold level of vibration velocity according to the Rayleigh distribution law for units in normal technical condition

Основні статистичні характеристики розподілу мають вигляд:

$$\bar{V} = \sigma \sqrt{\frac{\pi}{2}}, \quad M(V^2) = 2\sigma^2, \quad \sigma_v^2 = \frac{4-\pi}{2} \sigma^2,$$

де \bar{V} - математичне сподівання віброшвидкості,

$M(V^2)$ - другий момент,

σ_v^2 - дисперсія випадкової величини V .

Для відокремлення нормального стану агрегату від потенційно небезпечного вводиться пороговий рівень віброшвидкості, який позначимо через V_n . Це значення визначає межу, при

перевищенні якої система діагностики фіксує відхилення від норми.

Пороговий рівень може визначатися кількома способами. Один із них ґрунтується на другому моменті розподілу:

$$V_n = 2\sqrt{M(V^2)} = 2\sqrt{2}\sigma, \quad (4)$$

де $M(V^2)$ - другий момент випадкової складової.

Інший варіант базується на правилі «трьох сигм»:

$$V_n = \bar{V} + 3\sigma_v, \quad (5)$$

де \bar{V} - середнє значення віброшвидкості,

σ_V - стандартне відхилення.

Ймовірність хибного спрацювання системи контролю при цьому визначається як:

$$P_{\text{хибн}} = P(V > V_n) = \exp\left(-\frac{V_n^2}{2\sigma^2}\right), \quad (6)$$

Для підвищення точності діагностики застосовується критерій Неймана-Пірсона, який забезпечує оптимальний вибір порогу між гіпотезами:

H_0 : агрегат справний,

H_1 : агрегат має дефект.

Графічне представлення критерію наведено на рисунку 2.

Ймовірність пропуску дефекту визначається як:

$$\beta = \int_{-\infty}^{V_n} p_X(V) dV, \quad (7)$$

де β - імовірність того, що значення V залишиться нижчим за поріг, незважаючи на наявність дефекту.

Ймовірність хибного спрацювання:

$$\alpha = \int_{V_n}^{\infty} p_T(V) dV, \quad (8)$$

де α - імовірність того, що нормальний стан буде помилково класифіковано як дефект.

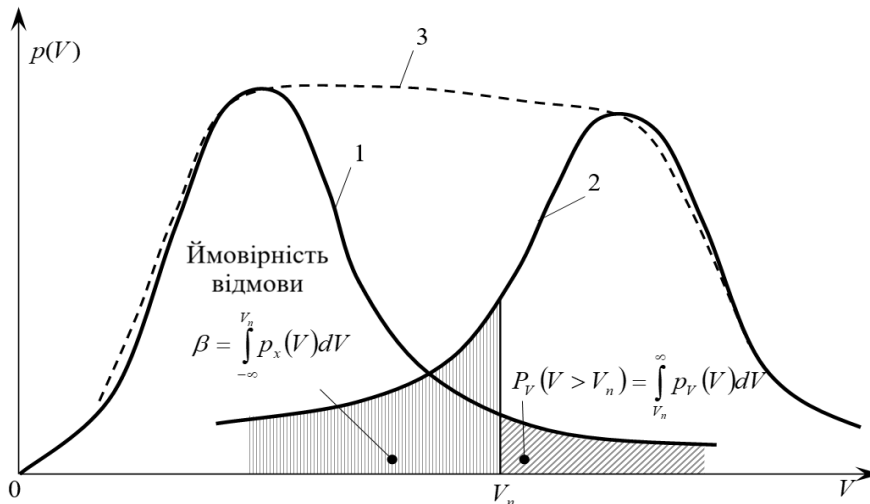


Рис. 2 – Вибір гіпотези про непотрібний ремонт з урахуванням критерію Неймана - Пірсона:

1 - щільність ймовірності нормальної роботи ; 2 - щільність ймовірності відмови;

3 - спільна щільність ймовірності тривоги відмови

Fig. 2 – Choosing a hypothesis about unnecessary repairs taking into account the Neumann-Pearson criterion:

1 - probability density of normal operation; 2 - probability density of failure;

3 - joint probability density of failure alarm

Для моделювання реальних вібраційних процесів використовується спектральний аналіз. На рисунку 3 наведено три типові моделі спектральної щільності віброшвидкості :

модель «гармоніка + шум»,

модель «гармоніки і шум»,

модель суми вузькосмугових процесів.

У загальному вигляді спектральна щільність може бути подана як:

$$G(f) = G_{\text{ш}} + \sum_{k=1}^n G_k \delta(f - kf_r), \quad (9)$$

де $G(f)$ - спектральна щільність віброшвидкості,

$G_{\text{ш}}$ - рівень шуму,

G_k - амплітуди гармонік,

f_r - частота обертання ротора,

δ - дельта-функція Дірака.

Для оцінювання якості сигналу використовується параметр «сигнал-шум»:

$$\alpha = \frac{\sigma_r}{\sigma_{\text{ш}}}, \quad (10)$$

де σ_r - дисперсія гармонічної складової,

$\sigma_{\text{ш}}$ - дисперсія шуму.

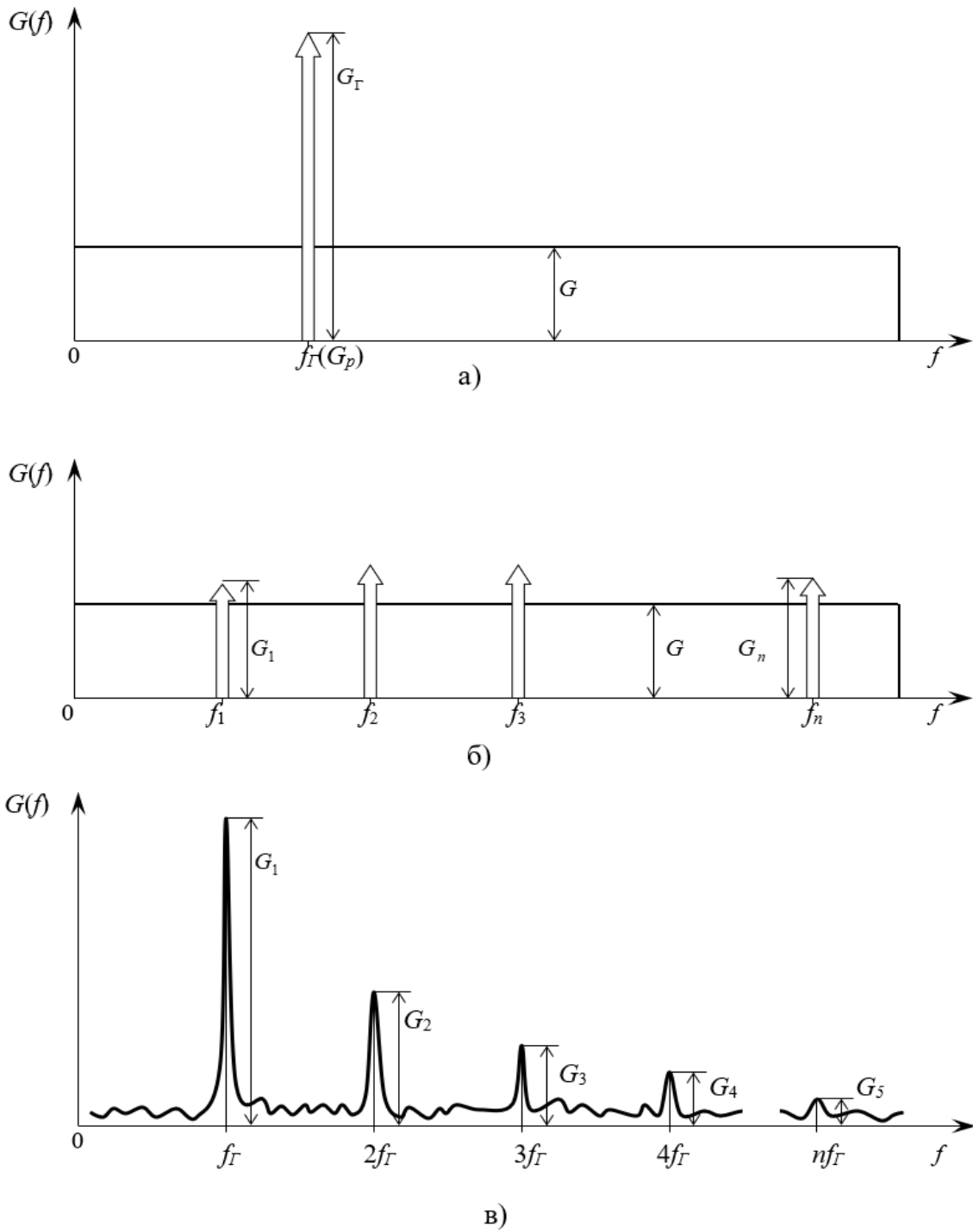


Рис.3 – Спектральна щільність віброшвидкості моделей вібрації:
 а) "гармоніка + шум"; б) "гармоніки в шумі"; в) сума вузькосмугових процесів
Fig. 3 – Spectral density of vibration velocity of vibration models:
 а) "harmonic + noise"; б) "harmonics in noise"; в) sum of narrowband processes

Для аналізу технічного стану агрегатів типу ГПА-10 використовуються статистичні параметри віброшвидкості, отримані на основі експлуатаційних вимірювань.

Табл. 1 містить середньоквадратичні значення віброшвидкості, коефіцієнти гармонік і шуму, ймовірності відмови для двох варіантів порогів та граничні значення віброшвидкості.

1. Середньоквадратичне значення віброшвидкості $V_{СКЗ}$

$$V_{СКЗ} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T V^2(t) dt}, \quad (11)$$

де $V^2(t)$ - миттєве значення віброшвидкості;

T - тривалість інтервалу вимірювання.

Ця величина характеризує загальний енергетичний рівень вібрації в контрольній точці.

2. Коефіцієнт гармонік

$$b = \frac{V_{\text{гарм}}}{V_{СКЗ}}, \quad (12)$$

де $V_{\text{гарм}}$ - амплітудна складова першої (основної) гармоніки.

Цей коефіцієнт показує, яку частку в загальній вібрації становить регулярна (детермінована) компонента.

3. Коефіцієнт шуму $c_{\text{ш}}^2$

$$c_{\text{ш}}^2 = \frac{V_{\text{ш}}^2}{V_{СКЗ}^2}, \quad (13)$$

де $V_{\text{ш}}^2$ - дисперсія шумової складової.

Цей параметр характеризує рівень випадкових коливань у сигналі (частку шумової енергії в загальній вібрації).

4. Ймовірність відмови (варіант I та II)

Ймовірність того, що віброшвидкість перевищить порогове значення V_n :

$$P_{\text{відм}} = \exp\left(-\frac{V_n^2}{2\sigma^2}\right), \quad (14)$$

де σ - параметр розподілу Релея,

V_n - пороговий рівень (варіант I або II).

Варіанти I та II відповідають різним методам визначення порогу (наприклад, за другим моментом або за правилом «трьох сигм»).

5. Відношення «сигнал–шум»:

$$\gamma = \frac{\sigma_r^2}{\sigma_{\text{ш}}^2}, \quad (15)$$

де σ_r^2 - дисперсія регулярної (гармонічної) складової,

$\sigma_{\text{ш}}^2$ - дисперсія шуму.

Відношення «сигнал–шум» є ключовим параметром для оцінки якості сигналу.

6. Коефіцієнт запасу міцності K

$$K = \frac{V_{\text{доп}}}{V_{СКЗ}}, \quad (16)$$

де $V_{\text{доп}}$ - допустиме (нормативне) значення віброшвидкості.

Варіанти I та II відповідають різним підходам до визначення $V_{\text{доп}}$.

7. Граничні значення віброшвидкості V

Це значення порогу, отримане за вибраним методом нормування:

Варіант I - більш консервативний (нижчі пороги).

Варіант II - менш консервативний (вищі пороги).

8. Нормативні значення віброшвидкості T

Це значення, встановлені заводськими або галузевими нормами, які використовують для порівняння з експлуатаційними даними.

Результати визначення граничних значень віброшвидкості корпусів підшипників газоперекачувального агрегату ГПА 10 наведено у таблиці 1.

Таблиця 1
Table 1
 Статистичні параметри віброшвидкості для контрольних точок агрегату ГПА-10
 Statistical parameters of vibration speed for control points of the GPA 10 unit

Параметр	Номер точки вимірювання				
	2	3*	4*	5	6*
Середньоквадратичне значення віброшвидкості парку ГПА $V_{СКЗ}$, мм/с	3,9	4,5	5,0	4,7	5,0
Коефіцієнт гармонік b , с/мм	0,120	0,118	0,114	0,117	0,111
Коефіцієнт шуму $c_{ш}^2$	0,008	0,010	0,011	0,010	0,012
Ймовірність відмови:					
- I варіант	0,13	0,15	0,16	0,15	0,17
- II варіант	0,10	0,12	0,13	0,12	0,14
Відношення «сигнал-шум» γ	15	13	12	13	11
Коефіцієнт запасу міцності K :					
- I варіант	2,73	2,85	2,93	2,89	2,92
- II варіант	3,00	3,15	3,23	3,18	3,22

Параметр	Номер точки вимірювання				
	2	3*	4*	5	6*
Граничні значення віброшвидкості $V_{доп}$, мм/с:					
- I варіант	11	11,5	12	11,7	12
- II варіант	13	13,5	14	13,7	14
Нормативні значення віброшвидкості [7, 8], мм/с	30	-	-	-	30

Проведена статистична обробка експлуатаційних даних для агрегатів типу ГПА-10 дозволила оцінити характер вібраційних процесів у різних контрольних точках. Середньоквадратичні значення віброшвидкості перебувають у межах 3,9...5,0 мм/с, що суттєво нижче за чинні нормативні значення $V_{доп} = 30$ мм/с. Це свідчить про значний запас міцності агрегатів за вібраційним критерієм.

Коефіцієнти гармонік b мають близькі значення у всіх точках (0,111-0,120), що вказує на стабільність регулярної складової сигналу та відсутність різких змін у динаміці ротора. Коефіцієнт шуму $c_{ш}^2$ перебуває в межах 0,008...0,012, що підтверджує низький рівень випадкових збурень і високу якість вимірювань.

Відношення «сигнал-шум» γ змінюється від 11 до 15, що відповідає домінуванню гармонічної складової над шумовою. Це узгоджується зі спектральними моделями, наведеними на рисунку 3, де основна енергія зосереджена

в околі першої гармоніки.

Ймовірності відмови для двох варіантів порогів становлять 0,10...0,17, що свідчить про те, що статистично обґрунтовані пороги $V_{доп}$ є значно нижчими за нормативні. Це підтверджується і розрахованими коефіцієнтами запасу міцності K , які для варіанта I становлять 2,7...2,93, а для варіанта II - 3,00...3,23. Таким чином, навіть при зниженні порогових значень у 2...3 рази агрегати залишаються у безпечному режимі роботи.

Аналіз показує, що статистично обґрунтовані пороги є нижчими за чинні нормативи, що свідчить про необхідність перегляду нормування з урахуванням реальних експлуатаційних умов.

Отримані результати демонструють, що застосування статистичних критеріїв дозволяє встановити більш реалістичні та обґрунтовані порогові рівні віброшвидкості, які краще відповідають фактичному стану обладнання та зменшують ризик хибних діагностичних рішень.

Висновки

У роботі виконано комплексний аналіз вібраційних процесів газоперекачувальних агрегатів на основі статистичних характеристик експлуатаційних даних та математичного моделювання. Показано, що випадкова складова віброшвидкості у нормальному технічному стані агрегатів адекватно описується законом Релея, що дозволяє застосовувати статистичні критерії для визначення порогових рівнів.

Введення порогового значення віброшвидкості $V_{\text{дод}}$ на основі другого моменту та правила «трьох сигм» забезпечує можливість кількісної оцінки ймовірностей хибних рішень. Застосування критерію Неймана-Пірсона дає змогу оптимізувати вибір порогу між гіпотезами «нормальний стан» та «дефект», мінімізуючи ризик пропуску небезпечного стану.

Спектральний аналіз підтвердив, що вібраційний сигнал агрегатів ГПА-10 формується поєднанням гармонічних та шумових складових, що узгоджується з отриманими моделями спектральної щільності. Результати статистичної обробки експлуатаційних даних показали, що фактичні рівні віброшвидкості значно нижчі за чинні нормативні значення, а статистично обґрунтовані пороги $V_{\text{дод}}$ є суттєво меншими за заводські норми.

Отримані результати свідчать про доцільність перегляду існуючих нормативів вібрації з урахуванням реальних

експлуатаційних характеристик та статистичної природи вібраційних процесів.

У подальшому представляє інтерес провести

- удосконалення математичних моделей вібраційних процесів з урахуванням нелінійних ефектів, зміни жорсткості опор, газодинамічних збурень та температурних впливів;

- розробку адаптивних порогових критеріїв, що автоматично змінюються залежно від режиму роботи агрегату та рівня шуму;

- поглиблений спектральний аналіз із застосуванням вейвлет-перетворень та методів високої роздільної здатності для раннього виявлення дефектів;

- створення цифрових двійників газоперекачувальних агрегатів для моделювання вібраційних процесів у реальному часі та прогнозування розвитку несправностей.

- розширення статистичної бази даних за рахунок різних типів агрегатів, умов експлуатації та додаткових точок вимірювання.

- розробку оновлених нормативів вібрації, гармонізованих із сучасними міжнародними стандартами серії ISO 20816 та їх національними аналогами.

- інтеграцію методів машинного навчання для автоматичної класифікації технічного стану агрегатів за вібраційними ознаками.

Конфлікт інтересів

Автори заявляють, що конфлікту інтересів щодо публікації рукопису немає. Крім того, автори повністю дотримувались етичних норм, включаючи плагіат, фальсифікацію даних та подвійну публікацію.

Список використаних джерел:

1. Комплексні обстеження надземного механічного технологічного обладнання компресорних станцій магістральних газопроводів СТП 320.30019801-2002. Офіц. вид. Київ : ДК «Укртрансгаз». 56 с.
2. ДСТУ 2389-94. Технічне діагностування та контроль технічного стану. Терміни та визначення. [Чинний від 1994-03-17]. Вид. офіц. Київ, 1995. 11 с.
3. ДСТУ 3160-95. Компресорне обладнання. Визначення вібраційних характеристик. Загальні вимоги. [Чинний від 1995-07-28]. Вид. офіц. Київ, 1995. 11 с.
4. ДСТУ 3161-95. Компресорне обладнання. Визначення вібраційних характеристик відцентрових компресорів та норми вібрації. ДСТУ 3161-95. [Чинний від 1995-07-28]. Вид. офіц. Київ, 1995. 18 с.

5. Прокопенко О. О., Антоненко Н. С., Гулей О. Б. Аналіз проблем організації контролю технічного стану газотранспортного обладнання та напрямки їх вирішення. *Вчені записки ТНУ імені В.І. Вернадського. Серія: технічні науки*. Київ, 2022. Т. 33 (72), № 1. С. 182-188. DOI: <https://doi.org/10.32838/2663-5941/2022.1/27>
6. Прокопенко О. О., Антоненко Н. С., Гулей О. Б. Метод параметричної діагностики газоперекачувального обладнання компресорної станції. *Вчені записки ТНУ імені В.І. Вернадського. Серія: технічні науки*. Київ, 2022. Т. 33 (72), № 5. С. 222-227.
7. ДСТУ ISO 20816-1:2021. Вібрація механічна. Вимірювання та оцінювання вібрації машин. Ч. 1. Загальні настанови. Київ : ДП «УкрНДНЦ», 2021. 34 с.
8. ДСТУ ISO 20816-4:2021. Вібрація механічна. Оцінювання вібрації машин. Ч. 4. Газотурбінні установки. Київ : ДП «УкрНДНЦ», 2021. 28 с.
9. Elbhah K., Sinha J. A future possibility of vibration based condition monitoring of rotating machines. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2013. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ymsp.2012.07.001>
10. Vibration Signal Analysis for Intelligent Rotating Machinery Diagnosis and Prognosis: A Comprehensive Systematic Literature Review / Bagri L., Tahiry K., Hraiba A., Touil A., Mousrij A. *Vibration*. 2024. № 7. Pp. 1013 - 1062. DOI: <https://doi.org/10.3390/vibration7040054>
11. Rotating Machinery Fault Diagnosis under Time-Varying Speed Conditions Based on Adaptive Identification of Order Structure / X. Yu, X. Chen, M. Du, Yang Yang Zhipeng Feng. *Processes*. 2024. № 12(4). Pp. 752. DOI: <https://doi.org/10.3390/pr12040752>
12. Bearing fault detection with vibration and acoustic signals: Comparison among different machine learning classification methods / Josué Pacheco-Chérrez, Jesús A. Fortoul-Díaz, Froylán Cortés-Santacruz, Luz María Alosó-Valerdi, David I. Ibarra-Zarate. *Engineering Failure Analysis*. 2022. Vol. 139. Pp 106515. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2022.106515>
13. Statistical distribution measures based on amplitude normalization for wind turbine generator bearing condition monitoring under variable speed conditions / Guangyao Zhang, Yi Wang, Yi Qin, Baoping Tang. *Mechanical Systems and Signal Processing*. 2025. Vol. 228. Pp. 112464. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ymsp.2025.112464>
14. Jablonski A., Bielecka M., Bielecki A. Unsupervised detection of rotary machine imbalance based on statistical signal properties. *Mechanical Systems and Signal Processing*. 2022. Vol. 167, Part A. Pp. 108497. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ymsp.2021.108497>
15. Elsamanty M., Abdelkader I., Wael Saady Salman. Principal component analysis approach for detecting faults in rotary machines based on vibrational and electrical fused data. *Mechanical Systems and Signal Processing*. 2023. Vol. 200. P. 110559. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ymsp.2023.110559>
16. Jiaming Lia, Chenhui Zhenga, Zhi-Xin Yanga. Review of fault diagnosis for rotating machinery: Prior knowledge integration in data-driven methods benefits model interpretability and generalizability. *Mechanical Systems and Signal Processing*. 2026. Vol. 242. Pp. 113623. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ymsp.2025.113623>
17. Data-statistical prognostics and health monitoring of small-scale hydrogen fueled gas turbines / Muhammad Baqir Hashmi, Amare Desalegn Fentaye, Mohammad Mansouri, Konstantinos G. Kyprianidis. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2025. Vol. 106. Pp. 96-118. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2025.01.437>
18. Comprehensive review of gas turbine fault diagnostic strategies / Mohammadjavad Soleimania, Fatemeh Negar Irania, Meysam Yadegara, Nader Meskin. *Applied Energy*. 2025. Vol. 401, Part C. Pp. 126801. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2025.126801>

Отримано: 06.04.2026 / Переглянуто: 08.05.2026 / Прийнято: 25.05.2026 / Опубліковано: 30.05.2026

¹**PROKOPENKO O.**, Candidate of Technical Sciences,
Associate Professor of the Department of Automation, Metrology and Energy Efficient Technologies
e-mail: o.o.prokopenko@karazin.ua ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6834-3056>

¹**ANTONENKO N.**, Candidate of Technical Sciences,
Associate Professor of the Department of Automation, Metrology and Energy Efficient Technologies
e-mail: n.s.antonenko@karazin.ua ORCID: <https://orcid.org/0009-0000-0879-1642>

²**TUPA I.**, Candidate of Technical Sciences,
Deputy Director for Occupational Health, Safety and Training
e-mail: igortyupa9@gmail.com ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8705-9122>

¹**KHALIMOV D.**,
Postgraduate student of the Department of Automation, Metrology and Energy Efficient Technologies
e-mail: ovcharovoleksandr1@gmail.com ORCID: <https://orcid.org/0009-0008-0919-8232>

¹**KHALIMOV P.**,
Postgraduate student of the Department of Automation, Metrology and Energy Efficient Technologies
e-mail: remontkhalimov@gmail.com ORCID: <https://orcid.org/0009-0006-6484-5872>

¹**YURECHKO D.**, candidate for the second (master's) level of higher education
Department of Automation, Metrology and Energy-Efficient Technologies
e-mail: yurechko.dima@gmail.com ORCID: <https://orcid.org/0009-0002-1389-6953>

¹*V.N. Karazin Kharkiv National University*
Svobody square, 4, Kharkiv, 61022, Ukraine
²*Utility company Kharkiv Thermal Networks*
11 Mefodiyevska St., Kharkiv,

STATISTICAL NORMALIZATION OF VIBRATION VELOCITY IN GAS COMPRESSOR UNITS BASED ON OPERATIONAL DATA ANALYSIS

This paper presents a novel approach to the normalization of overall vibration velocity levels in gas compressor units (GCUs) based on large-scale statistical analysis of operational data. Unlike traditional methods relying on fixed regulatory limits or empirical recommendations from international standards, the proposed methodology applies the Neyman-Pearson criterion to determine an optimal vibration threshold that minimizes the probability of incorrect diagnostic decisions.

Mathematical models of vibration velocity distribution are developed, incorporating both harmonic components and broadband noise. It is shown that, under real operating conditions, the vibration process can be effectively represented as a combination of Rayleigh distributions with different variances. Using experimental data from a fleet of 310 GCU - 10 units, statistical parameters of vibration velocity were obtained, and threshold values were calculated using two approaches: the second-order moment of the distribution and the classical “three-sigma” rule.

The results demonstrate that existing vibration standards significantly exceed statistically justified limits, which may reduce equipment lifetime and increase the risk of failures. The proposed approach enables the development of scientifically grounded vibration norms for specific measurement points and enhances operational reliability without additional maintenance costs.

Keywords: vibration velocity, gas compressor unit, statistical normalization, Neyman-Pearson criterion, Rayleigh distribution, reliability, condition monitoring, spectral analysis.

In cites: Prokopenko O., Antonenko N., Tupa I., Khalimov D., Khalimov P., Yurechko D. (2026). Statistical Normalization of Vibration Velocity in Gas Compressor Units Based on Operational Data Analysis. *Engineering*, (37), 64-76. <https://doi.org/10.26565/2079-1747-2026-37-05> (in Ukraine)

Conflict of interest

The authors declare that there is no conflict of interest regarding the publication of the manuscript. In addition, the authors fully complied with ethical standards, including plagiarism, data falsification, and double publication.

References

1. Ukrtransgaz 2002, *Kompleksni obstezhennia nadzemnoho mekhanichnoho tekhnolohichnoho obladnannia kompresornykh stantsii mahistralnykh hazoprovodiv STP 320.30019801-2002* [Comprehensive inspections of above-ground mechanical technological equipment of compressor stations of main gas pipelines.], Kyiv, 56 p.
2. Derzhavne kyivske konstruktorske biuro «Luch» 1995, DSTU 2389-94. Tekhnichne diahnostuvannia ta kontrol tekhnichnoho stanu. Terminy ta vyznachennia [Technical diagnostics and technical condition monitoring. Terms and definitions], Kyiv.
3. Derzhctandart Ukrainy 1995, DSTU 3160-95. Kompresorne obladnannia. Vyznachennia vibratsiinykh kharakterystyk. Zahalni vymohy [Compressor equipment. Determination of vibration characteristics. General requirements], Kyiv.
4. Derzhctandart Ukrainy 1995, DSTU 3161-95. Kompresorne obladnannia. Vyznachennia vibratsiinykh kharakterystyk vidtsentrovnykh kompresoriv ta normy vibratsii. DSTU 3161-95 [Compressor equipment. Determination of vibration characteristics of centrifugal compressors and vibration standards. DSTU 3161-95], Kyiv.
5. Prokopenko, OO, Antonenko, NS & Hulei, OB 2022, ‘Analiz problem orhanizatsii kontroliu tekhnichnoho stanu hazotransportnoho obladnannia ta napriamky yikh vyrishennia’ [Analysis of the problem of organizing control of the technical condition of gas transportation equipment and directions for their solution], *Vcheni zapysky TNU imeni V.I. Vernadskoho. Seriia: tekhnichni nauky*, Vol. 33 (72), № 1, Pp. 182-188. DOI: <https://doi.org/10.32838/2663-5941/2022.1/27> (in Ukraine)
6. Prokopenko, OO, Antonenko, NS & Hulei, OB 2022, ‘Metod parametrychnoi diahnostyky hazoperekachuvalnoho obladnannia kompresornoj stantsii’ [Method of parametric diagnostics of gas transmission equipment of compressor stations], *Vcheni zapysky TNU imeni V.I. Vernadskoho. Seriia: tekhnichni nauky*, Vol. 33 (72), № 5, Pp. 222-227.
7. Derzhctandart Ukrainy 2021, DSTU ISO 20816 1:2021. Vibratsiia mekhanichna. Vymiriuvannia ta otsiniuvannia vibratsii mashyn. Ch. 1. Zahalni nastanovy [Mechanical vibration. Measurement and control of machine vibrations. Ch. 1. General instructions], Kyiv.
8. Derzhctandart Ukrainy 2021, DSTU ISO 20816 4:2021. Vibratsiia mekhanichna. Otsiniuvannia vibratsii mashyn. Ch. 4. Hazoturbinni ustanovy [Mechanical vibration. Vibration measurement of machines. Ch. 4. Gas turbine installations], Kyiv.
9. Elbhbah, K. & Sinha, J 2013, ‘A future possibility of vibration based condition monitoring of rotating machines’, *Mechanical Systems and Signal Processing*. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ymsp.2012.07.001>
10. Bagri, L, Tahiry, K, Hraiba, A, Touil, A & Mousrij, A 2024, ‘Vibration Signal Analysis for Intelligent Rotating Machinery Diagnosis and Prognosis: A Comprehensive Systematic Literature Review’ *Vibration*, no 7, Pp. 1013 - 1062. DOI: <https://doi.org/10.3390/vibration7040054>
11. X. Yu, X. Chen, M. Du & Yang Yang Zhipeng Feng 2024, ‘Rotating Machinery Fault Diagnosis under Time-Varying Speed Conditions Based on Adaptive Identification of Order Structure’, *Processes*, no 12(4), Pp. 752. DOI: <https://doi.org/10.3390/pr12040752>
12. Josué Pacheco-Chérrez, Jesús A. Fortoul-Díaz, Froylán Cortés-Santacruz, Luz María Alos-Valerdi, David I. Ibarra-Zarate 2022, ‘Bearing fault detection with vibration and acoustic signals: Comparison among different machine learning classification methods’, *Engineering Failure Analysis*, Vol. 139, Pp 106515. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2022.106515>
13. Guangyao Zhang, Yi Wang, Yi Qin & Baoping Tang 2025, ‘Statistical distribution measures based on amplitude normalization for wind turbine generator bearing condition monitoring under variable speed conditions’, *Mechanical Systems and Signal Processing*, Vol. 228, Pp. 112464. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ymsp.2025.112464>
14. Jablonski, A, Bielecka, M & Bielecki, A 2022, ‘Unsupervised detection of rotary machine imbalance based on statistical signal properties’, *Mechanical Systems and Signal Processing*, Vol. 167, Part A, Pp. 108497. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ymsp.2021.108497>
15. Elsamanty, M, Abdelkader, I & Wael Saady Salman 2023, ‘Principal component analysis approach for detecting faults in rotary machines based on vibrational and electrical fused data, *Mechanical Systems and Signal Processing*, Vol. 200, P. 110559. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ymsp.2023.110559>

16. Jiaming Lia, Chenhui Zhenga & Zhi-Xin Yanga 2026, 'Review of fault diagnosis for rotating machinery: Prior knowledge integration in data-driven methods benefits model interpretability and generalizability', *Mechanical Systems and Signal Processing*, Vol. 242, Pp. 113623. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2025.113623>
17. Muhammad Baqir Hashmi, Amare Desalegn Fentaye, Mohammad Mansouri & Konstantinos G. Kyprianidis 2025, 'Data-statistical prognostics and health monitoring of small-scale hydrogen fueled gas turbines', *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 106, Pp. 96-118. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2025.01.437>
18. Mohammadjavad Soleimania, Fatemeh Negar Irania, Meysam Yadegara & Nader Meskin 2025, 'Comprehensive review of gas turbine fault diagnostic strategies', *Applied Energy*, Vol. 401, Part C, Pp. 126801. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2025.126801>

Submission received: 04.06.2026/Revised: 05.08.2026/Accepted: 05.25.2026/Published: 05.30.2026