

## **МЕТОДИКА КОНТРОЛЮ ТЕХНІЧНОГО СТАНУ ГАЗОПЕРЕКАЧУВАЛЬНОГО АГРЕГАТУ ГТК-25і В ПРОЦЕСІ ЕКСПЛУАТАЦІЇ**

**Л. М. Заміховський\*, О. Л. Заміховська, В. В. Павлик**

<sup>1</sup> ІФНТУНГ; 76019, м. Івано-Франківськ, вул. Карпатська, 15, тел. (0342) 727170,  
e-mail: [leozat@nimg.edu.ua](mailto:leozat@nimg.edu.ua)

На трансконтинентальному газопроводі «Уренгой-Помари-Ужгород» на початку 80-х років було встановлено 120 газоперекачувальних агрегатів (ГПА) ГТК-25і, три з яких знаходяться в експлуатації на КС-39 «У-П-У» Богородчанського ЛВУМГ. Сьогодні близько 80% ГТК-25і відпрацювали встановлений моторесурс, або близькі до цього. Подальша їх експлуатація не забезпечує надійної і ефективної роботи, у зв'язку з чим виникають численні відмови та аварії, що призводять до значних економічних збитків. Аналізуються методи параметричної і віброакустичної діагностики ГПА. Зазначено, що найбільш плідним часом розвитку методів віброакустичної діагностики ГПА є 70-90-і роки минулого століття. Сьогодні вони розвиваються в напрямку використання сучасних інформаційних технологій і різноманітних перетворень при обробці віброакустичних процесів для виявлення діагностичних ознак технічного стану ГПА. Щодо методів діагностування ГТК-25і, проведений аналіз свідчить про їх відсутність. Винятком є окремі методи їх діагностування на базі сучасних інформаційних технологій, які розроблені авторами статті. Водночас вдосконалена система автоматичного управління (САУ) ГТК-25і стосовно її технічного і програмного забезпечення дозволяє отримувати інформацію про додаткові (в порівнянні зі штатною САУ) технологічні параметри роботи ГТК-25і та віброакустичні процеси, що супроводжують його роботу та можуть бути використані для створення методів діагностування ГТК-25і. Розглядається методика контролю технічного стану ГТК-25і, яка базується на визначенні найбільших значень дискримінантних функцій для кожного з трьох технічних станів ГТК-25і за шістьнадцятьма технологічними параметрами та акустичними і вібраційними характеристиками. При цьому найкращим («номінальним») вважається стан ГТК-25і після проведення ремонтних робіт, «дефектний» стан – перед проведенням ремонтних робіт, а «поточний» – після відповідного періоду напрацювання ГТК-25і. Використання методики дозволило розробити комплексний метод, який є поєднанням методів параметричної і віброакустичної діагностики. Показано, що використання запропонованої методики дозволяє простежувати тенденцію до зміни технічного стану ГТК-25і в часі і спрогнозувати момент виведення його з експлуатації. Розроблений метод не вимагає для своєї реалізації додаткових технічних засобів, оскільки отримує інформацію з вдосконаленої САУ ГТК-25і, яка, в свою чергу, може використати результати діагностування для управління процесом компримування газу з врахуванням технічного стану ГТК-25і.

Ключові слова: технічний стан, методика, дискримінантний аналіз, ідентифікатор, кореляція, діагностична ознака, технологічні віброакустичні параметри.

На трансконтинентальном газопроводе «Уренгой-Помари-Ужгород» в начале 80-х годов было установлено 120 газоперекачивающих агрегатов (ГПА) ГТК-25и, три из которых находятся в эксплуатации на КС-39 «У-П-У» Богородчанского ЛПУМГ. Сегодня почти 80% ГТК-25и отработали установленный моторесурс, или близкие к его исчерпанию. Дальнейшая их эксплуатация не обеспечит надежной и эффективной работы, что подтвердится возникновением многочисленных отказов и аварий, приводящих к значительным экономическим потерям. Проанализированы методы параметрической и виброакустической диагностики ГПА. Отмечено, что наиболее плодотворным временем развития методов виброакустической диагностики ГПА являются 70-90-е годы прошлого века. Сегодня же их развитие проходит в направлении использования современных информационных технологий и различных преобразований при обработке виброакустических процессов для выявления диагностических признаков технического состояния ГПА. Что касается методов диагностирования ГТК-25и, проведенный анализ показал их отсутствие. Исключение составляют отдельные методы их диагностики на базе современных информационных технологий, которые разработаны авторами статьи. В то же время усовершенствование системы автоматического управления (САУ) ГТК-25и в плане ее технического и программного обеспечения, позволяет получать информацию о дополнительных (по сравнению со штатной САУ) технологических параметрах работы ГТК-25и и виброакустических процессах, сопровождающих его работу и могут быть использованы для создания методов диагностики ГТК-25и. Рассматривается методика контроля технического состояния ГТК-25и, базирующаяся на определении наибольших значений дискриминантных функций для каждого из трех технических состояний ГТК-25и по шестнадцати технологическим параметрам, а также акустическим и вибрационным характеристикам. При этом лучшим «номинальным» считается состояние ГТК-25и после проведения

ремонтных работ, «дефектное» состояние» – перед проведением ремонтных работ, а «текущее» – после соответствующего периода наработки ГТК-25и. Использование методики позволило разработать комплексный метод, который представляет собой сочетание методов параметрической и виброакустической диагностики. Показано, что использование предложенной методики позволяет проследить тенденцию к изменению технического состояния ГТК-25и во времени и спрогнозировать момент вывода его из эксплуатации. Разработанный метод не требует для своей реализации дополнительных технических средств, так как получает информацию от усовершенствованной САУ ГТК-25и, которая, в свою очередь, может использовать результаты диагностирования для управления процессом компримирования газа с учетом технического состояния ГТК-25и.

Ключевые слова: техническое состояние, методика, дискриминантный анализ, идентификатор, корреляция, диагностический признак, технологические. виброакустические параметры.

*In the early 1980s, 120 gas compressor units (GPU) type GTK-25i were installed on the Urengoy-Pomary-Uzhgorod transcontinental gas pipeline, and three of them are in operation at CS-39 "U-P-U" of the Bogorodchansk Linear Production Department of trunk gas pipelines. Today, about 80% of GPU type GTK-25i have worked out the established service life, or those close to it. Their further operation does not ensure reliable and efficient operation, and therefore numerous failures and accidents occur, leading to significant economic losses. Methods of parametric and vibroacoustic diagnostics of GPU are analyzed. It is noted that the most fruitful years of development of the methods of vibroacoustic diagnostics of GPUs are the 70-90s of the last century. Today, their development is taking place in the direction of using modern information technologies and various transformations in the processing of vibroacoustic processes to identify diagnostic signs of the technical state of the GPU. The methods of diagnosing GPU type GTK-25i the analysis showed their absence. The exception is certain methods of their diagnostics based on modern information technologies, which were developed by the authors of the article. At the same time, the carried out improvement of the automatic control system (ACS) of the GPU type GTK-25i in terms of its technical and software makes it possible to obtain information about additional, in comparison with the standard ACS, technological parameters of the GPU type GTK-25i operation and vibroacoustic processes that accompany its operation. and can be used to create diagnostic methods for GPU type GTK-25i. The methodology for monitoring the technical condition of GPU type GTK-25i based on the determination of the highest values of the discriminant functions for each of the three technical states of GPU type GTK-25i for 16 technological parameters and acoustic and vibration characteristics is considered. At the same time, the best "nominal" condition is considered to be the state of GPU type GTK-25i after the repair work, the "defective" state "- before the repair work, and" current "- after the corresponding operating time of the GPU type GTK-25i. The use of the technique made it possible to develop a complex method, which is a combination of parametric and vibroacoustic diagnostics methods. It is shown that the use of the proposed method allows tracing the trend of changes in the technical state of GPU type GTK-25i in time and predicting the moment of its decommissioning. The developed method does not require additional technical means for its implementation, as it receives information from the improved ACS GPU type GTK-25i, which, in turn, can use the diagnostic results to control the gas compression process, taking into account the technical condition of the GPU type GTK-25i.*

Keywords: technical condition, technique, discriminant analysis, identifier, correlation, diagnostic feature, technological vibroacoustic parameters.

### **Постановка і актуальність проблеми**

Забезпечення ефективної роботи газотранспортної системи України залежить, насамперед, від надійної роботи ГПА, зокрема ГТК-25і, які є її основними складовими. Сьогодні близько 80% ГТК-25і відпрацювали встановлений моторесурс, або близькі до цього. Подальша їх експлуатація не забезпечує надійної і ефективної роботи, у зв'язку з чим виникають численні відмови та аварії, що призводить до значних економічних збитків.

Надійна робота ГПА обумовлюється його поточним технічним станом, який потрібно контролювати в режимі реального часу, що вимагає використання ефективних методів діагностування ГПА.

На сьогодні відома значна кількість методів параметричної і віброакустичної діагности-

ки ГПА, а також методів діагностування, створених на базі сучасних інформаційних технологій – штучних нейронних мереж, генетичних алгоритмів і ін. Водночас відсутні методи діагностування, які б знайшли широке практичне застосування для контролю і визначення технічного стану ГПА. При цьому важливого значення набуває також задача передачі отриманої інформації про технічний стан ГПА її САУ для коригування режимів роботи ГПА. Така передача інформації можлива шляхом інтеграції технічних засобів і систем, які реалізують методи діагностування ГПА, в її САУ, або реалізацією самою САУ і її програмним забезпеченням алгоритмів діагностування.

Таким чином, існує актуальна проблема контролю технічного стану ГПА (зокрема ГТК-25і), яку необхідно вирішувати шляхом розроб-

лення нових методів його діагностування з передачею отриманих результатів у САУ ГТК-25і, що дозволить підвищити надійність його роботи та ефективність процесу компримування газу.

#### **Аналіз останніх досліджень і публікацій**

Сьогодні відома значна кількість наукових праць, присвячених розробці методів діагностування технічного стану механічної частини ГПА в процесі їх експлуатації. За допомогою таких методів вирішують три задачі діагностування: контролю працездатності (ступеня працездатності), дефектів, прогнозування технічного стану, або поєднання цих задач. Всі відомі методи діагностування ГПА можна поділити на дві великі групи [1].

– методи параметричної діагностики, які базуються на обробці і аналізі технологічних параметрів, що характеризують процес експлуатації ГПА;

– методи віброакустичної діагностики, які базуються на обробці і аналізі віброакустичних коливань, що генеруються вузлами і елементами ГПА в процесі експлуатації і несуть інформацію про його технічний стан.

При розробці методу діагностування основною задачею є вибір діагностичної ознаки стану ГПА (параметра або характеристики), зміна якої характеризує зміну технічного стану ГПА. Діагностичні ознаки вибираються в результаті аналізу діагностичної моделі.

Сутність параметричної діагностики полягає в [2, 3]:

– постійному або періодичному контролю поточних параметрів газового потоку і стану проточної частини;

– порівнянні отриманих даних з еталонними характеристиками;

– кількісному і якісному визначенню відхилень, з огляду на похибки вимірювання;

– попередженні обслуговуючого персоналу ГПА про наближення режиму його роботи до критичних точок (задовго до спрацьовування аварійних систем) або появи небажаних явищ в роботі газового тракту.

Визначення технічного стану газового тракту відцентрового нагнітача (ВН) ГПА, а також осьового компресора при використанні газотурбінного привода здійснюється методами функціонального діагностування [2,3], заснованими на аналізі результатів вимірювань відхилень основних вимірюваних робочих параметрів (ознак) - прямий метод аналізу. У разі, якщо деякі значення діагностичних параметрів не піддаються безпосередньому вимірюванню, їх

значення визначаються математичною обробкою інших параметрів. Реальні показники можуть відрізнятися від розрахункових, які пов'язані з ними фізичними і математичними залежностями з урахуванням можливих похибок систем і способів вимірювання (непрямий метод аналізу).

Метод дозволяє виявити тільки ті несправності, які викликають зміну відхилень термодинамічних параметрів (тиску, температур, витрат газу) від середніх, заданих технічною документацією значень.

В [4] розглядаються результати дослідних випробувань методології комплексної параметричної ідентифікації фактичних характеристик (КПФХ) ГТК-10 на КС «Бердичів», яка розроблена на базі алгоритму параметричної ідентифікації фактичних характеристик [5]. Одними із основних результатів випробувань, як зазначається в [4], є можливість здійснення прогнозування стану агрегату на найближчу перспективу за рахунок ідентифікації фактичних характеристик експлуатації на новому якісному рівні.

В [6] розробляються алгоритми для визначення дійсних основних параметрів ГТД в експлуатаційних умовах ГПА на основі математичного моделювання та рівнянь матеріальних балансів з використанням непрямих вимірювань. Можемо дійти висновку, що розроблений алгоритм визначення потужності і ККД ГТД за непрямыми вимірюваннями в поєднанні з діагностичними ознаками дефектів ГТД може бути використаний для їх виявлення.

В [7] основну увагу приділено методам оцінки технічного стану ГПА з використанням емпіричних і напівемпіричних залежностей, зокрема для ВЦН. До недоліків розроблених методів слід віднести відсутність методики отримання реальних експериментальних даних технологічних параметрів роботи ГПА та складність аналітичного описання процесів, що протікають у ньому.

Один з ефективних методів багатовимірного статистичного аналізу – метод факторного аналізу на прикладі вирішення задачі параметричного діагностування ГТД – розглянуто в [8]. Метод не вимагає додаткової вимірювальної апаратури і засновується на статистичній обробці параметрів, зареєстрованих штатними приладами. Застосування пакета Statistica виключає необхідність використання додаткових обчислювальних засобів і робить аналіз наочним і зрозумілим для користувача. Встановлено, що факторний аналіз параметрів ГТД дозволяє виявити на ранній стадії зміни робочого процесу

(виникнення дефекту), яке часто неможливо помітити шляхом безпосереднього спостереження за параметрами його роботи. Це пояснюється тим, що порушення кореляційних зв'язків між параметрами виникає значно раніше, ніж порушення рівня сигналу в одному вимірювальному каналі.

Робота [9] присвячена актуальним питанням та особливостям параметричної діагностики ГПА на КС «Крупська». Розглядаються результати експериментальних досліджень та зроблено висновки щодо ефективності запропонованої параметричної діагностики. Проте відсутня інформація щодо процедури і порядку її проведення на інших КС.

Методам діагностування дефектів газового тракту газотурбінних установок (ГТУ) присвячена робота [10]. Нова методика моделі класифікації діагностики несправностей газового тракту газової турбіни у вигляді ймовірнісної нейронної мережі (PNN) розглядається в [11], де її порівнюють з раніше запропонованими методиками. Зроблено висновок, що PNN не поступається іншим методам.

Для ГПА і його вузлів одним із найбільш ефективних за глибиною аналізу видів діагностики є методи вібродіагностики. До її переваг відноситься те, що вібраційними параметрами представлені практично всі основні вузли агрегатів, а також відносна простота одержання діагностичної інформації. Основні дослідження в напрямку розроблення методів віброакустичної діагностики машин, зокрема ГПА, були проведені в 70-90 роках минулого століття. Аналіз спектрів вібраційного і акустичного сигналів (шуму) осьового компресора ГТК-25і, побудованих з використанням методу Уелча, наводиться в [12]. Метою аналізу є виявлення діагностичних ознак його технічного стану. Встановлено, що акустичні коливання більш інформативні, характеризуються широким неперервним спектром з окремими дискретними складовими.

Дослідження щодо визначенню технічного стану лопатей компресора і турбіни ГТД, які аналізуються як у вигляді окремих компонентів, так і в складі робочих коліс, наводяться в [13]. Визначено інформативні параметри, що характеризують коливальний процес, та розроблено методи виявлення дефектів складових деталей ГПА. У роботі [14] подано короткий огляд і порівняння різних перетворень, які можуть бути виконані при обробці вібраційних процесів повітряного компресора для оцінки трьох його станів. Були використані наступні перетворення: швидке перетворення Фур'є,

дискретне косинусне перетворення, автокореляційна функція, розподіл класів Коена, S-перетворення і різні вейвлет-перетворення.

Алгоритм діагностики несправностей повітряного компресора, заснований на використанні вейвлет-перетворення та штучних нейронних мереж, розглядається в [15]. При цьому посилення в роботі на результати практичної реалізації розробленого алгоритму за допомогою технічних засобів чи в складі САУ ГПА відсутні.

### **Невирішені частини загальної проблеми**

Проведений аналіз стану проблеми діагностування технічного стану ГПА свідчить, що на сьогодні існує значна кількість методів параметричної і віброакустичної діагностики ГПА, серед яких перевага віддається останнім. При цьому для виявлення діагностичних ознак стану ГПА використовуються різноманітні перетворення для обробки вібраційних процесів (швидке перетворення Фур'є, дискретне косинусне перетворення, автокореляційна функція, розподіл класів S-перетворення, різні вейвлет-перетворення та ін.), а також штучні нейронні мережі. Переважна більшість розглянутих методів розроблена для діагностування ГПА конкретного типу або їх функціональної частини.

Стосовно питання контролю і діагностування ГПА типу ГТК 25і, то сьогодні практично відсутні публікації щодо розроблення методів їх діагностування. Винятком є роботи [12] і [16], де досліджуються діагностичні ознаки технічного стану ГТК-25і шляхом обробки акустичного процесу, що супроводжує його роботу, з використанням вейвлет-перетворення, та робота [18], в якій для вирішення аналогічної задачі пропонується використати штучну нейронну мережу.

Таким чином, розроблення методів діагностування технічного стану ГТК-25і залишається актуальною задачею, яка вимагає свого вирішення.

### **Мета та завдання досліджень**

Метою роботи є підвищення надійності і ефективності експлуатації ГТК-25і шляхом контролю його фактичного технічного стану в процесі експлуатації. Для цього необхідно розробити метод діагностування ГТК-25і, який не вимагає технічних засобів для його реалізації, а використовує для цих цілей вдосконалене технічне та програмне забезпечення штатної САУ ГТК-25і.

Таблиця 1 – Розраховані значення за антипомпажним параметром

Lag	group=a AutocorrelationFunction (R_sample.sta) Антипомпажний параметр (Standard errors are white-noise estimates)			
	Auto-Corr.	Std.Err.	Box&Ljung Q	p
1	-0,078635	0,053994	2,12098	0,145303
2	0,004168	0,053915	2,12696	0,345265
3	-0,039230	0,053835	2,65797	0,447429
4	0,017584	0,053755	2,76497	0,597900
5	0,012234	0,053675	2,81692	0,728185
6	0,012113	0,053595	2,86800	0,825217
7	-0,059225	0,053514	4,09281	0,769020
8	-0,106290	0,053434	8,04972	0,428653
9	0,106068	0,053353	12,00199	0,213250
10	0,005814	0,053273	12,01390	0,284178
11	-0,002892	0,053192	12,01685	0,362420
12	0,097276	0,053111	15,37148	0,221813
13	-0,002197	0,053030	15,37320	0,284700
14	0,013174	0,052949	15,43510	0,349127
15	-0,024682	0,052868	15,65307	0,405521

**Висвітлення основного матеріалу дослідження та одержаних результатів**

За останні роки в Бородчанському ЛВУМГ на КС-39 «У-П-У» було вдосконалено САУ ГТК-25і шляхом розроблення її додаткового технічного і програмного забезпечення. Технічне забезпечення включало монтаж відповідних давачів для вимірювання додаткових технологічних і вібраційних параметрів, а також розробку системи акустичного контролю роботи ОК на базі чутливого електретного мікрофону, використання якої дозволило вимірювати акустичні коливання, що супроводжують роботу ГТК-25і.

Додаткове програмне забезпечення розроблено у вигляді спеціального програмного пакета на базі SCADA – програми Wizcon 8.3, використання якого дозволяє, зокрема, проведення оброблення даних та реалізацію алгоритмів діагностування технічного стану ГТК-25і та його САУ.

Маючи можливість отримання інформації про технологічні і віброакустичні параметри роботи ГТК-25і, було прийнято рішення застосувати дискримінантний (лінійний) аналіз для визначення діагностичної ознаки технічного стану ГТК-25і з використанням результатів спостережень за зміною його технологічних параметрів у процесі експлуатації для різних технічних станів ГПА. Технічні стани обумовлювалися періодом експлуатації ГТК-25і. При цьому визначення діагностичної ознаки не ви-

магає додаткової вимірювальної апаратури і засновується на статистичній обробці технологічних і віброакустичних параметрів, зареєстрованих штатними приладами САУ.

При розробці методу діагностування використовувалася вибірка технологічних і віброакустичних параметрів роботи ГТК-25і на КС-39 «У-П-У» тривалістю понад 4 роки, яка включала періоди виведення його в ремонт, після ремонтний період, а також період тривалої експлуатації після ремонту, що фактично відповідало трьом технічним станам ГТК-25і – «дефектний», «номінальний» та «поточний».

Процедура визначення технічного стану ГПА включає дискримінантний аналіз часових реалізацій значень технологічних параметрів, записаних кожні 30 с для трьох технічних станів: «номінальний» (ідентифікатор “a”=“after”) «дефектний» (ідентифікатор “b”=“befor”) та «поточний» (ідентифікатор “w”=“work”). Об’єм вибірки становив 36 тис. даних, що записувалися через 0,2с. Для статистичної обробки даних використовувались можливості програмних середовищ R [18] та STATISTICA [19].

Було здійснено відбір технологічних параметрів зі всієї сукупності їх часових реалізацій (мета – вилучення параметрів, які корелюють між собою) з використанням програмного середовища R, в результаті чого відібрано по 340 значень з кожного набору відповідно розглянутих ситуацій. Для прикладу, в табл. 1 наведено отримані у такий спосіб дані стосовно анти-

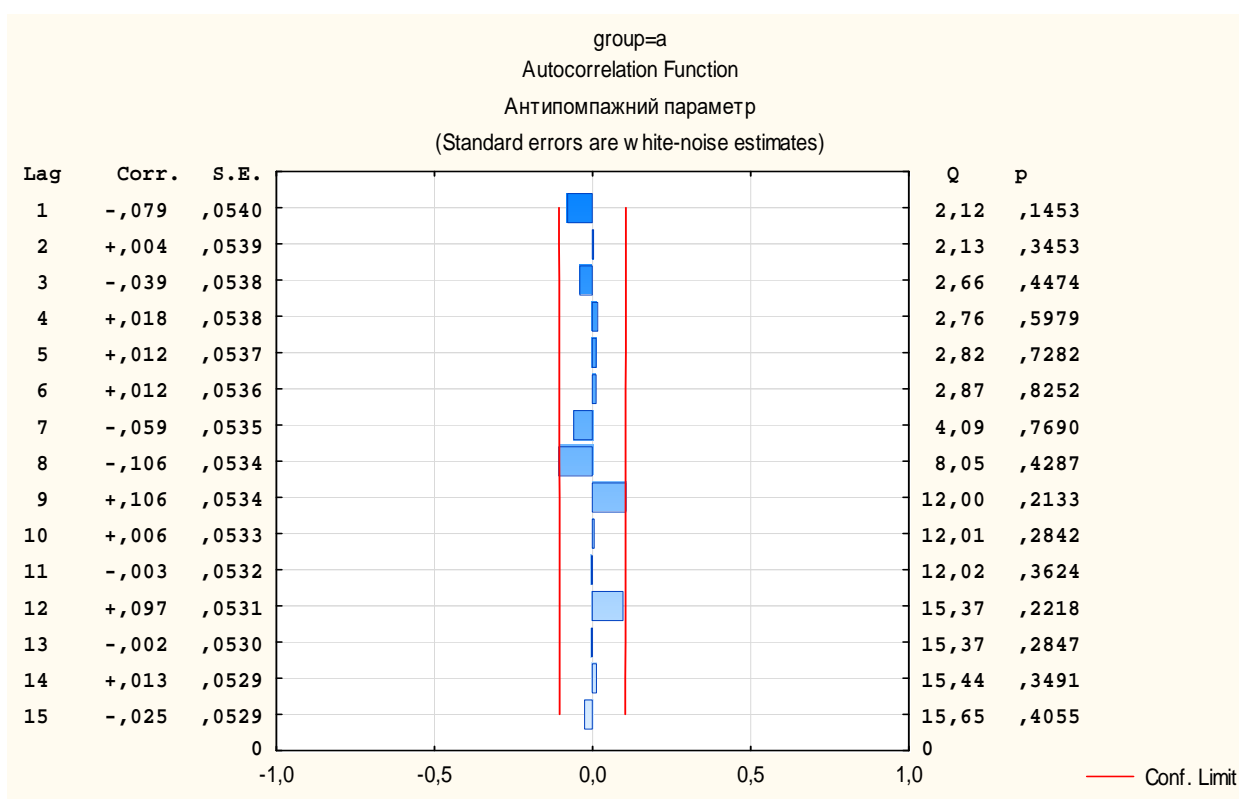


Рисунок 1 – Графік автокореляційної функції вибірки антипомпажного параметру, побудований випадковим вибором з даних часових рядів

помпажному параметру, а на рис. 1 графік його автокореляційної функції.

Етапи методу включають:

- поділ вибірки на дві частини (парні та непарні номери). За першою підвибіркою з використанням дискримінантного аналізу будується процедура визначення технічного стану ГПА, а елементи другої підвибірки перевіряються на належність до наявних станів («a»–«b»–«w»).

Для цього використовується покроковий дискримінантний аналіз, реалізований в програмному пакеті STATISTICA.

Отриманими результатами є (табл. 2):

- набір характеристик (Variable), за якими можна найбільш достовірно визначити стан ГПА;

- коефіцієнти дискримінантних функцій (Classification Functions) для кожного із станів;

- визначення значення дискримінантних функцій досліджуваного ГПА для кожного стану. Це лінійні комбінації значень характеристик (із стовпчика Variable) з коефіцієнтами, наведеними в стовпчиках «a», «b» чи «w», плюс вільний член з рядка Constant;

- визначення стану ГПА за найбільшим значенням дискримінантних функцій для нього.

Застосовуючи описану методику до елементів другої частини вибірки, одержали результати, відображені в табл. 3.

У рядках «a», «b», «w» табл. 3 вказано спостережувані (реальні) стани ГТК-25i, у відповідних стовпчиках – прогнозовані (одержані за розробленим методом стани). На перетині цих рядків та стовпчиків наведено кількості випадків.

Засоби R дозволяють спроектувати три групи даних – діагностичних ознак у вигляді «хмарок» на площину і відобразити їх на графіку. Найкращий напрям проектування вибирається за допомогою того ж дискримінантного аналізу.

На рис. 2 зображено таку проєкцію діагностичних ознак. Кожне значення діагностичної ознаки позначено буквою («a», «b», «w»), що відповідає реальному стану ГТК-25i. LD1 та LD2 – означають координати на площині проєкції.

Як видно з рис. 2, всі три значення діагностичних ознак чітко розрізняють три стани ГПА.

Найкращий стан ГПА (a) – «номінальний» стан ГТК-25i після проведення ремонтних робіт при якому значення діагностичної ознаки знаходиться на початку площини, (b) – «дефектний» стан (перед проведенням ремонтних робіт) відповідає найбільшому значенню діагностичної ознаки і, нарешті, після тривалого напруження стан ГТК-25i наближається до незадовільного (w).

Таблиця 2 – Результати дискримінантного аналізу

Величини вимірювання	Classification Functions; grouping: group (R_sample.sta) Include condition: Ceiling(v0/2)-v0/2=0		
	a p=,33333	b p=,33333	w p=,33333
Тиск на виході	210	534	471
Рівень масла в баці	354	382	395
Кількість обертів ТВТ	32	29	29
Температура на вихлопі	-4	-6	-4
Тиск осьового копресора	270	255	265
Оберти ГНТ	-3	-4	-4
Антипомпажний параметр	118	117	119
Тиск гідравлічного мастила	158	158	160
Constant	-169874	-180456	-184631

Таблиця 3 – Результати визначення діагностичних ознак технічного стану ГПА

Group	ClassificationMatrix (R_sample.sta) Rows: Observedclassifications Columns: Predictedclassifications Excludecondition: Ceiling(v0/2)-v0/2=0			
	Percent Correct	a p=,33333	b p=,33333	w p=,33333
a	100,000	170	0	0
b	100,000	0	170	0
w	100,000	0	0	170
Total	100,000	170	170	170

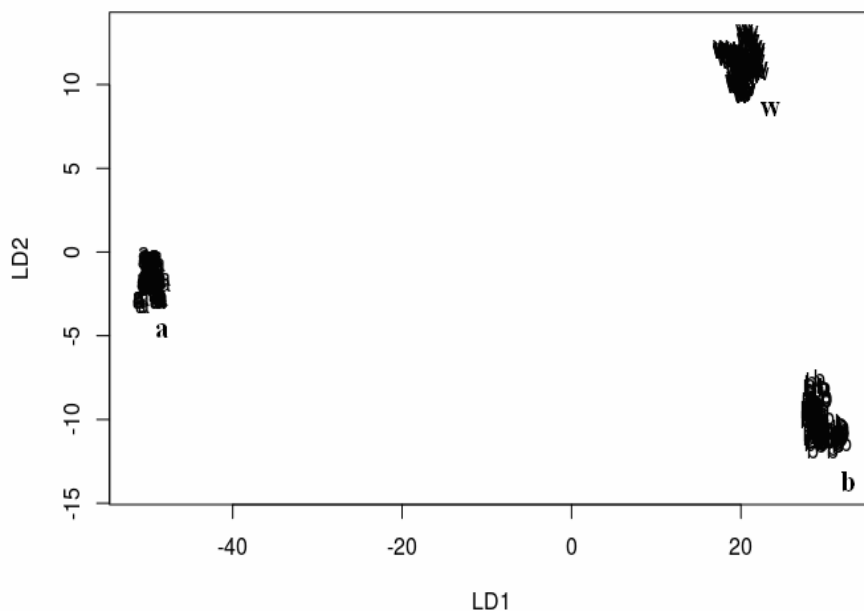


Рисунок 2 – Проекція значень діагностичних ознак на площину станів ГПА

Описану процедуру отримання діагностичних ознак технічного стану ГТК-25і можна застосувати не тільки до технологічних параметрів, що характеризують режим його роботи, але і до вібраційної та акустичної діагностичної інформації. В цьому випадку рівні шуму та віб-

рації виміряні кожні 200 мс, відповідають часовим рядам, а процедура визначення діагностичної ознаки ГПА за середньоквадратичними відхиленнями його характеристик (шум, вібрація) полягає в наступному:

Таблиця 4 – Результати визначення діагностичних ознак

Group	ClassificationMatrix (dat_train_test.sta)			
	Percent Correct	a p=,33333	b p=,33333	w p=,33333
a	100,0000	667	0	0
b	100,0000	0	672	0
w	100,0000	0	0	661
Total	100,0000	667	672	661

- з кожного часового ряду випадковим чином відбирається частини рядів довжиною 300 вимірів (або 60 с). Кожна з вибірок містить 1000 часових рядів;

- за кожним відібраним рядом оцінюється середньоквадратичне відхилення;

- з трьох вибірок середньоквадратичних відхилень будується категоризована об'єднана вибірка. Категорії ідентифікуються аналогічно наведеним вище: за допомогою таких значень: «а» – «номінальний» стан, «b» – «дефектний» та «w» – «поточний».

Випадковим вибором відбирається 1000 вибірових значень для процедури побудови дискримінантних функцій. Решта вибірових значень (2000 спостережень) використовується для перевірки одержаної процедури класифікації.

В результаті лінійного дискримінантного аналізу знайдено лінійні дискримінантні функції для кожної з груп спостережень («а» – «номінальний», «b» – «дефектний» та «w» – «поточний»).

$$f_a=0,386*X_1+0,064*X_2-894,820;$$

$$f_b=0,1162*X_1+0,0274*X_2-97,3223;$$

$$f_w=0,0481*X_1+0,0039*X_2-12,9307,$$

де  $X_1$  – значення середньоквадратичного відхилення характеристики (шум),

$X_2$  – значення середньоквадратичного відхилення характеристики (вібрація).

При цьому вибрано рівні (0,33333) апіорні ймовірності належності спостережень до цих груп. Згідно розробленої у такий спосіб процедури дане спостереження відноситься до тієї групи або технічного стану ГТК-25і («а», «b» чи «w»), для якої значення відповідної дискримінантної функції ( $f_a$ ,  $f_b$  чи  $f_w$ ) є найбільшим.

Для перевірки якості процедури класифікації застосовуємо розроблену процедуру класифікації до спостережень тестової вибірки, які не брали участі в розробці процедури. Об'єм такої вибірки становить 2000 значень. Результат зведено в таблиці 4.

Рядки табл. 4 (а, b, w) відповідають реальним технічним станам ГТК-25і, в яких були відібрані спостереження. Стовпчики — прогнозованим технічним станам. Як видно з табл. 4, в 100% випадків прогнозні дані корелюють з вимірними.

Канонічний аналіз дозволяє знайти площину (набір з двох характеристик) проєкції, на яку даних трьох груп найкраще розрізняються. Ці характеристики (Root 1 та Root 2) утворюються з даних ( $X_1$  та  $X_2$ ) з допомогою коефіцієнтів, тобто

$$\text{Root 1}=-0,0097*X_1-0,0014*X_2+20,8493;$$

$$\text{Root 2}=0,005214*X_1-0,003754*X_2+0,226723.$$

В системі координат Root1 – Root 2 дані спостереження виглядають наступним чином (рис. 3).

Як видно з рис. 3, дані технічні стани, як і в попередньому випадку, досить добре розрізняються. Крім того, таке графічне представлення дає можливість спрогнозувати зміну технічного стану ГПА на подальший період його експлуатації і визначити час проведення ремонтних робіт.

### Висновки

З використанням дискримінантного аналізу технологічних і віброакустичних параметрів роботи ГТК-25і розроблено комплексний метод діагностування технічного стану ГТК-25і – поєднання методів параметричної і віброакустичної діагностики.

Розроблено методику визначення діагностичних ознак технічного стану ГТК-25і, яка базується на визначенні найбільших значень дискримінантних функцій досліджуваного ГТК-25і для кожного з його трьох технічних станів за шістьнадцятьма технологічними параметрами та акустичними і вібраційними характеристиками. При цьому найкращим («номінальним») вважається стан ГТК-25і після проведення ремонтних робіт, «дефектний стан» – перед проведенням ремонтних робіт, а «поточ-



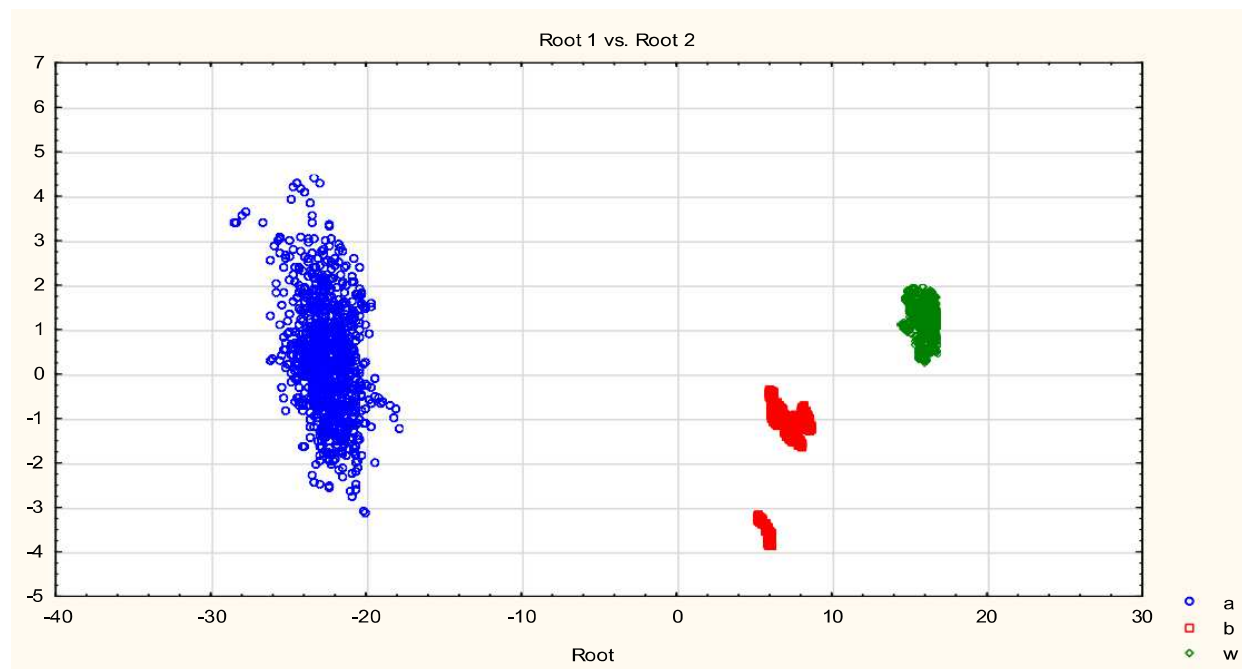


Рисунок 3 – Графічне представлення множини технічних станів ГТК 25і

ний» – після відповідного періоду напрацювання ГТК-25і.

Представлення виявлених діагностичних ознак стану ГТК-25і у вигляді «хмарок» на площині і відображення їх на графіку дозволяє простежити тенденцію до зміни технічного стану ГТК-25і в часі і спрогнозувати момент виведення агрегату з експлуатації.

Розроблений метод не вимагає для реалізації додаткових технічних засобів, оскільки використовує інформацію з вдосконаленої САУ ГТК-25і, яка, в свою чергу, може використати отриману інформацію для управління процесом компримування газу з врахуванням технічного стану ГТК-25і.

### Література

1. Заміховський Л.М., Саприкін С.О. Концепція моніторингу технічного стану газоперекачувального обладнання. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ»: збірник наукових праць; тематичний випуск: Нові рішення в сучасних технологіях*. Харків: НТУ ХПІ, 2009. № 8. С. 64-68.

2. Кунина П.С, Павленко. П.П. Діагностика газоперекачуючих агрегатів с центробежними нагнетателями. Ростов-на-Дону, изд-во РГУ, 2001. 362 с.

3. Технічна діагностика трубопровідних систем / [В.Я.Грудз, Я.В. Грудз, В.В.Костів та ін.]. Івано-Франківськ: Лілея-НВ, 2012. 512 с.

4. Приймак К.О., Оліневич Н.В., Дашенко О.П. Дослідне випробування методології комплексної параметричної ідентифікації фактичних характеристик енергетичного об'єкту. *Енергетика: економіка, технології, екологія*, 2015. № 1. С.47-54.

5. Варламов Г.Б., Приймак К.О. Алгоритм параметричної ідентифікації фактичних характеристик газоперекачувального агрегату компресорної станції. *Енергосбереження, енергетика, енергоаудит*. 2011. №12 (94). С. 10-13.

6. Герасименко В.П. Алгоритмы определения основных параметров газотурбинных газоперекачивающих агрегатов в эксплуатации. *Вестник Национального технического университета «Харьковский политехнический институт», серия «Энергетические и теплотехнические процессы и оборудование»*. 2009. № 3. С. 116-121.

7. Возняк М.П., Юрчило Т. В. Діагностування технічного стану нагнітача газоперекачувального агрегату з використанням реальних режимних параметрів його роботи. *Науковий вісник ІФНТУНГ*. 2012. № 2(32). С. 215-221.

8. Рыбалко В.В. Параметрическое диагностирование энергетических объектов на основе факторного анализа в среде Statistica. *Exponenta Pro: Математика в приложениях*, 2004. № 2(6). С. 78-83.

9. Купреев Е.И., Карницкий Н.Б. Параметрическая диагностика газоперекачивающих агрегатов. *Экономика и менеджмент инновационных технологий*. 2016. № 3(90). С. 12-18.

10. Loboda I., Olivares Robles M.A. Gas turbine fault diagnosis using probabilistic neural networks. *Int. J. Turbo Jet-Engines*. 2015, No 32, P. 175–191.
11. Early Fault Detection of Hot Components in Gas Turbines (Article) / L. Jinfu, L. Jiao, W. Jie [and other]. *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*. 2017. Volume 139, Issue 2, Article number 021201.
12. Заміховський Л.М., Павлик В. В. Дослідження вібраційного стану осевого компресора ГПА ГТК 25ї фірми «Нуово Пінньоне». *Методи і прилади контролю якості*. 2014. № 1(32). С. 28-38.
13. Kochergin A.V., Pavlova N.V., Valeeva K.A. Vibroacoustic Control of Technical Conditions of GTE. *Procedia Engineering* Volume 150, 2016, Pages 363-369, 2nd International Conference on Industrial Engineering, ICIE 2016; Chelyabinsk; Russian Federation; 19 May 2016 through 20 May 2016; Code 123270 (Conference Paper) (Open Access).
14. Signal transforms for feature extraction from vibration signal for air compressor monitoring (Conference Paper) / N.K. Verma, R. Gupta, R.K. Sevakula, A. Salour. *IEEE Region 10 Annual International Conference, Proceedings / TENCON* Volume 2015 - January, 26 January 2015, Article number 70222752014 IEEE Region 10 Conference, TENCON 2014; Bangkok; Thailand; 22 October 2014 through 25 October 2014; Category number CFP14TEN-ART; Code 112841.
15. Yang W.S., Su Y.X., Chen Y.P. Air compressor fault diagnosis based on lifting wavelet transform and probabilistic neural network (Conference Paper). *OP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2019, Vol. 657, Issue 1, Article number 0120532nd International Conference on Numerical Modelling in Engineering, NME 2019; Beijing; China; 19 August 2019 through 22 August 2019; Code 153583. (Open Access).
16. Zamikhovskiy L., Zamikhovska O., Pavlyk V. Research of the characteristics of acoustic processes using wavelet transformation for detecting a diagnostic sign of the technical state of gas pumping units. *TECHNOLOGY AUDIT AND PRODUCTION RESERVES*, 2021. No 1/2(57). P. 6-12. DOI: 10.15587/2706-5448.2021.224432
17. Заміховський Л.М., Павлик В.В. Контроль технічного стану газоперекачувальних агрегатів на базі штучних нейромереж. *Нафтогазова енергетика – 2017: Міжнародна науково-технічна конференція, Івано-Франківськ, 15-19 травня 2017 р.* – С. 317-318.
18. R Core Team R: A language and environment for statistical computing. *R Foundation for Statistical Computing*, Vienna, Austria. (2016). URL <https://www.R-project.org/>.
19. StatSoft, Inc. (2011). STATISTICA (data analysis software system), version 10. [www.statsoft.com](http://www.statsoft.com).

## References

- Zamikhovsky L.M., Saprykin S.O. The concept of monitoring the technical condition of gas pumping equipment. *Visnyk Natsionalnoho technichnoho universytetu*. 2009. No 8, P. 64-68 [in Ukrainian].
- Kunin P.S., Pavlenko P.P. Diagnostics of gas pumping units with centrifugal blowers. 2001. 362 p. [in Russian].
- Grudz, V. Ya., Grudz, Ya. V., Kostiv, V.V. Technical diagnostics of pipeline systems. 2012. 512 p. [in Ukrainian].
- Priymak K.O., Olynevych N.V., Dashchenko O.P. Pilot testing of the methodology for complex parametric identification of the actual characteristics of a power facility. 2015. No 1. P. 47-54 [in Ukrainian].
- Varlamov H. B., Priymak K.A. Algorithm for parametric identification of the actual characteristics of the gas-pumping unit of the compressor station. 2011. No 12 (94). P. 10-13 [in Ukrainian].
- Gerasimenko V.P. Algorithms for determining the main parameters of gas turbine gas compressor units in operation. 2009. No 3. P. 116-121 [in Russian].
- Wozniak M.P., Yurchilo T.V. Diagnostics of the technical condition of the gas compressor unit blower using the real operating parameters of its operation. 2012. No 2(32). P. 215-221 [in Ukrainian].
- Rybalko V.V. Parametric diagnostics of energy facilities based on factor analysis in the Statistica environment. 2004. No 2(6). P. 78-83 [in Russian].
- Kupreev E.I., Karnitsky N.B. Parametric diagnostics of gas pumping units. 2016. No 3(90). P. 12-18 [in Russian].
- Loboda I., Olivares Robles M.A. Gas turbine fault diagnosis using probabilistic neural networks. *Int. J. Turbo Jet-Engines*. 2015, No 32, P. 175–191.

11. Early Fault Detection of Hot Components in Gas Turbines (Article) / L. Jinfu, L. Jiao, W. Jie [and other]. *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*. 2017. Volume 139, Issue 2, Article number 021201.
12. Zamikhovsky L.M., Pavlyk V.V. Investigation of the vibration state of an axial compressor GPU type GTK-25-i by "Nuovo Pigneone". 2014. No 1(32). P. 28-38 [in Ukrainian].
13. Kochergin A.V., Pavlova N.V., Valeeva K.A. Vibroacoustic Control of Technical Conditions of GTE. *Procedia Engineering* Volume 150, 2016, Pages 363-369, 2nd International Conference on Industrial Engineering, ICIE 2016; Chelyabinsk; Russian Federation; 19 May 2016 through 20 May 2016; Code 123270 (Conference Paper) (Open Access).
14. Signal transforms for feature extraction from vibration signal for air compressor monitoring (Conference Paper) / N.K. Verma, R. Gupta, R.K. Sevakula, A. Salour. *IEEE Region 10 Annual International Conference, Proceedings / TENCON* Volume 2015 - January, 26 January 2015, Article number 70222752014 IEEE Region 10 Conference, TENCON 2014; Bangkok; Thailand; 22 October 2014 through 25 October 2014; Category number CFP14TEN-ART; Code 112841.
15. Yang W.S., Su Y.X., Chen Y.P. Air compressor fault diagnosis based on lifting wavelet transform and probabilistic neural network (Conference Paper). *OP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2019, Vol. 657, Issue 1, Article number 0120532nd International Conference on Numerical Modelling in Engineering, NME 2019; Beijing; China; 19 August 2019 through 22 August 2019; Code 153583. (Open Access).
16. Zamikhovskiy L., Zamikhovska O., Pavlyk V. Research of the characteristics of acoustic processes using wavelet transformation for detecting a diagnostic sign of the technical state of gas pumping units. *TECHNOLOGY AUDIT AND PRODUCTION RESERVES*, 2021. No 1/2(57). P. 6-12. DOI: 10.15587/2706-5448.2021.224432
17. Zamikhovsky L.M., Pavlyk V. V. Control of technical condition of gas pumping units on the basis of artificial neural networks. 2017. P. 317-318 [in Ukrainian].
18. R Core Team R: A language and environment for statistical computing. *R Foundation for Statistical Computing*, Vienna, Austria. (2016). URL <https://www.R-project.org/>.
19. StatSoft, Inc. (2011). STATISTICA (data analysis software system), version 10. [www.statsoft.com](http://www.statsoft.com).