

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ІВАНО-ФРАНКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ
УНІВЕРСИТЕТ НАФТИ І ГАЗУ

ПАВЛИК ВОЛОДИМИР ВАСИЛЬОВИЧ

УДК 628.517.622.691.4.052

**КОМПЛЕКСНИЙ МЕТОД ТА СИСТЕМА КОНТРОЛЮ
ТЕХНІЧНОГО СТАНУ ГАЗОПЕРЕКАЧУВАЛЬНИХ
АГРЕГАТІВ ВЕЛИКОЇ ПОТУЖНОСТІ**

Спеціальність 05.11.13 – Прилади і методи контролю
та визначення складу речовин

АВТОРЕФЕРАТ
дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Івано-Франківськ – 2021

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана в Івано-Франківському національному технічному університеті нафти і газу Міністерства освіти і науки України

Науковий керівник: - доктор технічних наук, професор
Заміховський Леонід Михайлович,
Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу, завідувач кафедри інформаційно-телекомунікаційних технологій і систем

Офіційні опоненти: - доктор технічних наук, професор,
Кучерук Володимир Юрійович,
Вінницький національний технічний університет, завідувач кафедри метрології та промислової автоматизи

- кандидат технічних наук, доцент,
Ровінський Віктор Анатолійович,
Прикарпатський національний університет імені Василя Стефаника, доцент кафедри комп'ютерних наук та інформаційних систем

Захист відбудеться 12 травня 2021р. о 11 годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 20.052.03 в Івано-Франківському національному технічному університеті нафти і газу за адресою: 76019, м. Івано-Франківськ, вул. Карпатська, 15; тел. +38 (342) 54-42-66.

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу (76019, м. Івано-Франківськ, вул. Карпатська, 15)

Автореферат розісланий « 8 » квітня 2021 року

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради Д 20.052.03,
кандидат технічних наук, доцент



Т. В. Гуменюк

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Обґрунтування вибору теми дослідження. Газотранспортна система (ГТС) України є однією з найбільших у світі як за протяжністю, так і за обсягом транзиту газу. Кількість компресорних станцій (КС) ГТС становить 72, де встановлено 702 газоперекачувальних агрегатів (ГПА) загальною потужністю 5,4 тис. МВт. Кількість типів ГПА, які використовуються у складі КС, нараховує понад 25 різновидів, з яких газотурбінні ГПА становлять - 76,7% (20 типів). Серед ГПА з газотурбінним приводом частка ГПА великої потужності – 25МВт типу ГТК-25і та ГПА-25С складає 18,6%, що становить значний відсоток від загальної потужності газотурбінних ГПА. ГПА типу ГТК-25і італійської фірми «Нуово-Піньйоне» були введені в експлуатацію на початку 1980-х років, після завершення будівництва трансконтинентального газопроводу «Уренгой-Помари-Ужгород». 6 ГПА-25С вітчизняного виробництва були введені в експлуатацію протягом останніх 6 років, всього на газопроводі «Уренгой-Помари-Ужгород» встановлено 120 ГПА потужністю 25МВт.

Сьогодні більше 60% ГПА ГТК-25і відпрацювали встановлений моторесурс, або близькі до нього. Подальша їх експлуатація не забезпечує надійної і ефективної роботи у зв'язку з чим виникають багато чисельні відмови та аварії, що призводять до значних економічних збитків.

Враховуючи, що разом з ГТК-25і поставлялися системи автоматичного управління (САУ), які на даний час є морально застарілими і практично вичерпали свій ресурс, то актуальною є задача підвищення ефективності і надійності роботи ГТК-25і в комплексі з САУ, що вимагає застосування методів і засобів технічної діагностики, які забезпечать експлуатацію ГТК-25і за фактичним технічним станом.

Сьогодні стосовно ГПА відома значна кількість методів параметричного та вібраційного діагностування технічного стану як ГПА в цілому, та і окремих його вузлів. Суттєвий вклад в їх розробку внесли вітчизняні та зарубіжні вчені - І. І. Артоболевський, Ф. Я. Балицький, В. І. Бельський, І. А. Бесклетний, Ю. Н. Васильєв, А. А. Вітта, З. Т. Галіулін, Н. Т. Гаркаві, М. Д. Генкін, Н. В. Григор'єв, В. Я. Грудз, С. В. Єпіфанов, Л. М. Заміховський, С. П. Заріцький, В. Г. Засецький, Є. О. Ігуменцев, В. І. Костін, П. П. Пархоменко, А. А. Петросян, Б. П. Поршаков, К. М. Рагульскис, Д. Ф. Симбірський, В. Я. Сковородін, А. Г. Соколова, В. А. Соляник, Н. Г. Шульженко, Л. А. Шубенко-Шубін, В. Л. Христинзен, Sterzl Jskar, C. R. Burrows, O. C. Turkey, R Monk і ін..

Щодо діагностування САУ ГПА то сьогодні практично відсутні методи їх діагностування, що обумовлюється відсутністю системного підходу до визначення технічного стану існуючих САУ ГПА за даними експлуатації.

Таким чином, не дивлячись на високий рівень методів параметричної і вібраційної діагностики ГПА, стосовно ГПА великої потужності, зокрема ГТК-25і, існує ряд не вирішених науково-технічних задач, пов'язаних з розробкою методів і засобів діагностування його механічних вузлів та САУ.

У зв'язку з цим, їх вирішення є актуальною задачею, яка має важливе народно-господарське значення.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Тематика дисертації є частиною планових науково-дослідних програм із розвитку

нафтопромислового комплексу України і базується на результатах науково-дослідної роботи «Наукові засади побудови на базі сучасних інформаційних технологій розподілених систем моніторингу, контролю, управління та діагностування об'єктів нафтогазового комплексу України», номер державної реєстрації в УкрНДІНТІ №018U006957, «Методологічні засади побудови систем управління, діагностування та енергозберігаючих систем частотного управління електроприводом для об'єктів нафтогазового комплексу» номер державної реєстрації в УкрНДІНТІ №0112U006551, а також госпдоговірної теми № 1703000635 з АТ «Укртрансгаз» «Розробка діагностичного забезпечення (методичної та нормативної бази) технічного стану систем автоматики на об'єктах філії УМГ «ПРИКАРПАТТРАНСГАЗ» номер державної реєстрації в УкрНДІНТІ № 0117U003214.

Мета роботи: Розроблення комплексу методів параметричної і віброакустичної діагностики ГПА великої потужності та методу діагностування САУ, а також системи для їх реалізації, використання яких дозволить отримувати оперативну і достовірну інформацію про технічний стан ГПА та їх САУ в процесі експлуатації та проводити ремонтні роботи за фактичним технічним станом.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити наступні задачі:

- проаналізувати сучасні тенденції розвитку методів і засобів діагностування технічного стану ГПА великої потужності (стосовно ГТК-25і) та їх САУ;
- провести теоретичне обґрунтування методу діагностування САУ та методологічне обґрунтування щодо вдосконалення методу діагностування ГТК-25і на базі штучних нейронних мереж;
- розробити методичне, технічне і програмне забезпечення експериментальних досліджень технічного стану ГТК-25і з його САУ та проаналізувати результати експериментів;
- розробити методи параметричної і акустичної діагностики ГТК-25і та метод діагностування його САУ;
- провести розрахунок ефективності діагностування технічного стану ГТК-25і та його САУ;

Об'єкт дослідження – процеси зміни технічного стану ГТК-25і та його САУ, які викликані розвитком дефектів його механічних вузлів і елементів САУ, що призводять до зниження ефективності і надійності роботи ГТК-25і з САУ та виникнення аварійних ситуацій.

Предметом дослідження є розробка методів параметричної і віброакустичної діагностики ГТК-25і та методу діагностування його САУ.

Методи дослідження. Для вирішення поставлених завдань використовувалися методи технічної діагностики, основні положення віброакустичної діагностики машин і механізмів, методи теорії надійності і математичної статистики, методи ідентифікації об'єктів, методи спектрального і кореляційного аналізу, методи дискримінантного аналізу, методи обробки сигналів. При розробці технічного забезпечення використовувалися методи системо- і схемотехніки, а при розробці програмного забезпечення – методи об'єктно-орієнтованого програмування.

Наукова новизна отриманих результатів:

- *вперше* з використанням метода параметричної ідентифікації (методу Симою) досліджена діагностична ознака – площа нормованих передавальних функцій ГПА та

встановлено її взаємозв'язок зі зміною технічного стану САУ ГТК-25і, що покладений в основу методу діагностування САУ ГТК-25і, використання якого, на відміну від відомих методів діагностування САУ ГПА, дозволить підвищити вірогідність діагностування до 0,93;

– *вперше* з використанням вейвлет-перетворення при обробці акустичного процесу, що супроводжує роботу ГПА, виявлена діагностична ознака - значення норми апроксимації та норм деталізації по відношенню до норми сигналу (у відсотках) для п'ятирівневого вейвлет-розкладу, зміна якої, на відміну від відомих методів обробки сигналів, при зміні технічного стану ГПА описується лінійною залежністю;

– *вперше* розроблено метод діагностування ГТК-25і, що ґрунтується на визначенні найбільших значень дискримінантних функцій його технологічних параметрів та вібраційних і акустичних характеристик, який, на відміну від існуючих методів параметричної і віброакустичної діагностики ГПА, є комплексним методом, що не вимагає для своєї реалізації додаткових технічних засобів, оскільки використовує інформацію з вдосконаленої САУ ГТК-25і;

– *отримав подальший розвиток* метод обробки акустичних процесів, що супроводжують роботу ГТК-25і, з використанням штучних нейронних мереж для його діагностування, використання якого дозволило зі значенням метрики f_1 не менше 0,8 розрізнити три стани ГТК-25і: «номінальний», «поточний» та «дефектний», а подальше навчання нейронної мережі дасть можливість прогнозувати зміну технічного стану ГТК-25і та проводити ремонтні роботи за його фактичним станом.

Практичне значення отриманих результатів полягає в розробці:

– методики отримання розгінних характеристик САУ ГПА за вхідними впливами у режимі пуску ГПА, що дало змогу отримати експериментальні дані для побудови нормованих передавальних функцій ГПА;

– алгоритмів визначення технічного стану осьового компресора ГТК-25і за його технологічними параметрами та вібраційними і акустичними характеристиками, використання яких дозволяє прогнозувати момент виникнення аварійних ситуацій, пов'язаних з відмовою вузлів та елементів ГТК-25і;

– вдосконаленої системи контролю ГТК-25і на КС-39 «У-П-У» Богородчанського ЛВУМГ шляхом додаткового контролю вібраційних і акустичних процесів, що супроводжують його роботу ГТК-25і та температури корпусу ОК;

– з використанням SCADA - програми WIZCON 8.3 та спеціального програмного пакету з мнемосхемами і трендами, прив'язаними до технологічних схем ГТК 25і, який виконує функцію опитування давачів, а також візуалізації, архівації технологічних параметрів;

– програми обробки сигналів з електретного мікрофона з використанням програмного пакету Steinberg Nuendo 3.2.0 для подальшої детальної обробки і збереження результатів запису акустичних сигналів та ведення інформаційної бази даних, яке надалі може бути покладене в основу експертної системи;

– програми обробки у середовищі MatLab розгінних характеристик ГТК-25і для визначення діагностичної ознаки стану його САУ – площі нормованих передавальних функцій.

Розроблені методи контролю і діагностування пройшли промислову апробацію на КС-39 «У-П-У» Богородчанського ЛВУМГ (акт від 12.08.2020 р.) і рекомендовані до впровадження та на КС-3 Долинського ЛВУМГ (акт від 18.07.2019 р.).

Результати теоретичних і експериментальних досліджень впроваджено в навчальному процесі – в робочих програмах навчальних дисциплін «Об'єкти і процеси управління нафтогазового комплексу» та «Методи і засоби діагностування об'єктів нафтогазового комплексу» (акт від 19.05.2020 р.), які читаються студентам спеціальності 151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології» за освітньою програмою «Комп'ютеризовані системи управління та автоматика».

Особистий внесок здобувача. Основні положення та результати дисертаційної роботи отримані автором самостійно [7]. У співавторстві: проаналізовано спектр акустичних сигналів компресора ГТК 25і та запропоновано діагностичні ознаки його стану [5, 24], запропонована система контролю технологічних параметрів і віброакустичних характеристик та їх отримання під час пуску осьового компресора і в різний період його напруцювання [3, 26], запропоновано метод діагностування САУ ГТК 25і та отримані його розгінні характеристики протягом року напруцювання [2], обгрунтовано використання віброакустичних характеристик ОК ГТК 25і для контролю його технічного стану [6, 23, 27], удосконалено систему управління та модернізовано реєструючі пристрої систем управління на КС Богородчанського ЛВУМГ [8 – 13, 25], запропонована методика проведення експериментальних досліджень технічного стану лопатей осьового компресора ГПА [16, 18], проведена оцінка статистичних характеристик параметрів ГПА ГТК-25і [22], запропоновані методика і процедура використання дискримінантного аналізу для виявлення діагностичних ознак технічного стану ГПА ГТК 25і при використанні вібраційної і акустичної діагностичної інформації [4, 20, 21], побудована двошарова ієрархічна ШНМ прямого поширення, що тренується за алгоритмом зворотного поширення похибки, з метою контролю технічного стану ГПА [17], використано для обробки віброграм симплет-вейвлет четвертого порядку та розглянуто процедуру опрацювання віброграм [1, 19], запропоновано метод діагностування САУ ГТК 25і в складі комплексного методу діагностування ГПА [15], запропоновано процедуру розрахунку показника готовності [14].

Автор приймав безпосередню участь у проведенні досліджень та обробці експериментальних даних.

Апробація результатів досліджень. Основні результати дисертаційної роботи доповідалися і обговорювалися на I, II, III і IV Міжнародній науковій конференції «Вимірювання, контроль та діагностика в технічних системах», Вінниця.- 2011, 2013, 2015 та 2017 р.р., Обласній науково-практичній конференції «Вчені Прикарпаття – сталому розвитку краю», Івано-Франківськ.- 2012р., Міжнародній науково-технічній конференції «Проблеми і перспективи транспортування нафти і газу», Івано-Франківськ.- 2012 р., Міжнародній науково-технічній конференції «Нафтогазова енергетика 2013», Івано-Франківськ.- 2013р., II Всеукраїнській науково-практичній конференції молодих учених і студентів «Інформаційні технології в освіті, техніці та промисловості», Івано-Франківськ.- 2015р., IV Міжнародній науково-практичній конференції «Summer InfoCom 2017», Київ.- 2017р., VIII Міжнародній науково-технічній конференції «Сучасні прилади, матеріали і технології для неруйнівного

контролю і технічної діагностики машинобудівного і нафтогазопромислового обладнання», Івано-Франківськ.- 2017р., Methods of diagnosing the technical state of the gas-pumping unit GTC -25I of Nuovo Pignone company, Banja Luka, Bosnia and Herzegovina.- 2017, Міжнародній науково-технічній конференції «Нафтогазова енергетика – 2017», Івано-Франківськ.- 2017р., The 10th International scientific and practical conference “Dynamics of the development of worldscience”(10-12.06. 2020), Vancouver, Canada.- 2020, The 3rdInternational scientific and practical conference “Science and education: problems, prospects and innovations” (2-4.12. 2020), Kyoto, Japan.- 2020.

Публікації. За результатами досліджень, які викладені в дисертації, опубліковано 27 робіт, з яких 5 статей у наукових фахових виданнях України, 3 входять до міжнародних науко-метричних баз Scopus, Index Copernicus, 15 у збірниках праць та тезах міжнародних і вітчизняних конференцій.

Структура та обсяг роботи. Дисертаційна робота викладена на 189 сторінках, із них 136 сторінок основного тексту, складається з вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел із 106 позицій, містить 49 рисунків, 24 таблиці та 8 додатків.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі обґрунтована актуальність проблеми, показано зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами, визначено мету і завдання дослідження, сформульована наукова новизна та практичне значення отриманих результатів.

У першому розділі проведений аналіз конструктивних особливостей ГТК-25і з точки зору контролепридатності, який показав, що при проектуванні конструкції ГТК-25і не передбачалися місця для встановлення штатних давачів за допомогою яких можна було б проводити діагностування технічного стану ГТК-25і, прогнозувати його зміну в процесі експлуатації та визначити час проведення ремонтних робіт. Наявність штатних засобів контролю технологічних параметрів, як показала тривала практика експлуатації ГТК-25і, недостатня для організації моніторингу та діагностики стану підшипників, проточної частини ОК і інших його вузлів.

Тривалий період експлуатації ГПА (більше 30 років) призвів до того, що значний відсоток ГПА по АТ «Укртрансгаз» відпрацював свій установлений моторесурс або близький до цього. Подальша експлуатація ГПА призводить до погіршення їх технічного стану і, як наслідок, виникнення відмов і аварійних ситуацій. Аналіз дефектів основних вузлів ГПА в процесі експлуатації показав, що основна частина аварійних зупинок і вимушених простоїв пов'язані з дефектами механічного обладнання, а друге місце за кількістю відмов займають САУ та засоби автоматики – більше 40 %.

Проведені обстеження САУ на КС, які експлуатуються на основних експортних магістральних газопроводах, показали, що вони фізично і морально застаріли, двічі відпрацювали паспортний ресурс і потребують негайної заміни, яка вимагає значних фінансових витрат. Впровадження інженерно-технічних рішень, що дозволяють продовжити термін експлуатації САУ ГПА, та заміна САУ застарілого типу на нові, як показав проведений аналіз, не призводить до значного підвищення надійності ГПА.

Проведений аналіз методів діагностування ГПА та їх САУ показав, що при розробці методів віброакустичної і параметричної діагностики, як правило, механічних вузлів і деталей ГПА дослідники основну увагу приділяють і продовжують приділяти виявленню діагностичних ознак їх стану. Для цього перетворення віброакустичних сигналів і технологічних параметрів з метою їх подальшої обробки проводиться з використанням швидкого перетворення Фур'є, автокореляційної функції, різних вейвлет-перетворень і ін., а обробка отриманих даних проводиться з використанням методів кореляційного, дискримінантного аналізу, штучних нейронних мереж, генетичних алгоритмів та ін. методів.

Сьогодні відсутній системний підхід до розробки методів діагностування, при якому ГПА з САУ розглядається як єдина динамічна система, складовими якої є як механічні вузли і деталі, так САУ та автоматики. У зв'язку з цим значно меншої уваги приділялось розробленню методів контролю працездатності і діагностування САУ ГПА. Це можна пояснити складним і мало вивченим характером взаємодії САУ ГПА з окремими складовими ГПА при виникненні як їх відмов, так і САУ та засобів автоматики. В той же час, вирішення вказаної задачі може ґрунтуватись на методах параметричної ідентифікації. Вони передбачають проводити оцінку стану динамічної системи, якою є ГПА з САУ, на основі аналізу її перехідного процесу при деякому типовому входньому впливі та знаходженні параметрів передавальної функції основних контурів управління ГПА.

На підставі проведеного аналізу сучасного стану проблеми сформульовано мету і завдання дисертаційної роботи.

У другому розділі розроблені теоретичні засади методу діагностування САУ ГПА за їх розгінними характеристиками. При цьому розглядається нормована функція передачі ГПА

$$W(s) = k \frac{1 + \sum_{j=1}^m b_j s^j}{1 + \sum_{i=1}^n a_i s^i}, \quad (1)$$

для якої $k=1$.

При експериментальних дослідженнях вихідна величина об'єкта (ГПА) $Y(t)$ є розмірною величиною. Тому для отримання нормованої перехідної характеристики вихідну величину $Y(t)$ подамо у відносних одиницях

$$y(t_k) = \frac{Y(t_k)}{Y_{\max}}, \quad k = \overline{1, N}, \quad (2)$$

де Y_{\max} значення вихідної величини $Y(t_k)$ в експериментальному дослідженні при $t=t_N$; N - потужність масиву експериментального дослідження.

Оскільки розгінні характеристики об'єкта за своїм характером є аперіодичними, то полюси $s_i, i = \overline{1, n}$ нормованої функції передачі (1) розміщені у лівій напівплощині комплексної площини коренів. Допускаємо, що серед полюсів $s_i, i = \overline{1, n}$ немає кратних.

Величину $y(t)$ знаходять із функції передачі (1) за умови, що вхідна величина

$x(t)=1(t)$. У такому випадку $\lim_{t \rightarrow \infty} y(t) = 1$.

Тоді зображення вихідної величини $y(t)$ за Лапласом буде $Y(s) = w(s) / s$.

У відповідності з теоремою лишків, за відомою функцією передачі (1), коли $X(s) = 1/s$ можна знайти нормовану перехідну характеристику за формулою

$$y(t) = \sum_{i=0}^n \lim_{t \rightarrow s_i} (s - s_i) Y(s) e^{st}.$$

Оскільки $Y(s)$ має один нульовий корінь, то $y(t) = 1 + \sum_{i=1}^n \lim_{t \rightarrow s_i} (s - s_i) Y(s) e^{st}$.

Беручи до уваги, що знаменник функції $w(s)$ є поліном степені n , функцію $Y(s)$ подають у формі:

$$Y(s) = \frac{1 + \sum_{j=1}^m b_j s^j}{s \left(1 + \sum_{i=1}^n a_i s^i \right)}. \quad (3)$$

Вираз $1 + \sum_{i=1}^n a_i s^i$ розкладають на прості множники. Тоді $Y(s) = \frac{1 + \sum_{j=1}^m b_j s^j}{a_n s \prod_{i=1}^n (s - s_i)}$.

З врахуванням останнього виразу формула (3) набуває вигляду:

$$y(t) = 1 + \frac{1}{a_n} \sum_{k=1}^n B_k \frac{e^{s_k t}}{s_k} \prod_{\substack{i=1, \\ i \neq k}}^n \frac{1}{s_k - s_i}, \quad (4)$$

де $B_k = 1 + \sum_{j=1}^m b_j s_k^j$; s_i, s_k - полюси функції $Y(s)$.

При цьому технічний стан САУ ГПА визначається за зміною площі S , яка утворена перехідною характеристикою (4) і є діагностичною ознакою, зміна якої характеризує зміну технічного стану ГПА. Очевидно, що при $t \rightarrow \infty$ площа S також буде прямувати до нескінченності. Тому кінцевий час t_f при обчисленні S виберемо із умови $y(t_f) = y_f$.

Виходячи з досвіду використання нейронних мереж для контролю та діагностування окремих вузлів ГПА та турбін, для діагностування технічного стану ГТК-25і запропоновано використання двох шарів ієрархічні нейронні мережі прямого поширення, що тренується за алгоритмом зворотного поширення похибки, а моделювання ГПА з різними технічними станами: «номінальним» (після проведення ремонту), «поточним» та «дефектним» станом (до проведення ремонту) проводити на основі отриманих результатів вимірювання і обробки характеристик акустичних процесів, генерованих ГПА з використанням методу ШПФ та отриманням спектру процесу, а також значень середнього квадратичного відхилення для кожної їх вибірки.

У третьому розділі досліджуються вібраційний стан ГТК-25і, статистичні характеристики акустичного процесу, що супроводжує його роботу, та розробляється методичне, програмне і технічне забезпечення експериментальних досліджень.

Методика передбачала збір статистичних даних про параметри експлуатації ГТК-25і, які були отримані з існуючої бази даних вдосконаленої САУ враховуючи додатковий контроль наступних технологічних параметрів: вібрації опорного підшипника №1 ОК, температури його корпусу, тиску повітря (продуктивності) на виході ОК, та здійснення акустичного контролю його роботи. Для експериментальної перевірки розробленого методу діагностування САУ ГПА за його розгінними характеристиками методика передбачала проведення експериментів шляхом зняття розгінних характеристик ГТК-25і при його пуску (технологічному, та відповідно до затвердженої програми пусків) на протязі дев'яти місяців 2019 року.

Для виконання цих досліджень було розроблено їх технічне і програмне забезпечення. Система контролю технічного стану ГТК-25і (рис. 1) побудована на базі двох комплектів 8-ми каналних мікропроцесорних реєстраторів-регуляторів типу МТР-8 до яких підключено вихідні сигнали з давачів технологічних параметрів.

Для здійснення акустичного контролю розроблена система на базі електретного мікрофона і підсилювача, проведені його розрахунок та перевірка схеми з використанням програми Micro-Cap 7.

Для обробки експериментальних даних був розроблений комплексний пакет програмного забезпечення для моніторингу стану ГТК-25і на базі SCADA - програми WIZCON 8.3 та он-лайн записів і обробки акустичних сигналів з використанням програмного пакету SteinbergNuendo 3.2.0. Технологічні параметри за допомогою програм записувалися і архівувалися у вигляді таблиць Excel.

Для реалізації методу діагностування САУ у середовищі MatLab розроблено програмне забезпечення, яке дає змогу визначити параметри передавальної функції за експериментальною кривою об'єкта та величиною площі, що обмежена перехідною функцією $y(t)$ об'єкта.

В розділі розглядаються також результати експериментальних досліджень вібраційного стану ГТК-25і в процесі яких проводилося вимірювання віброакустичних сигналів при його запуску та в усталеному режимі роботи для двох станів «дефектний» (до ремонту ГТК-25і) і «номінальний» (після ремонту), з метою виявлення діагностичних ознак його стану.

Вихідними даними для розрахунку була інформація про кількість лопатей на всіх ступенях ОК, лопатей ТВТ, а також кінематична схема редуктора та інформація про кількість зубів на колесах кожної із ступенів редуктора $n_1, n_2, n_3, n_4, n_5, n_6$.

Були отримані орієнтовні значення всіх частот при номінальній частоті обертів ротора $F_0 = 5106.2$ об/хв. Аналіз спектрів показав, що на частотах обертання проміжного валу, валів генератора та змашувального насосу, а також на частотах зубозачеплення редуктора помітних максимумів не спостерігається. Тому для аналізу було вибрано частоту обертання основного валу і перші п'ять її гармонік та лопатеві частоти і перші три їх гармоніки.

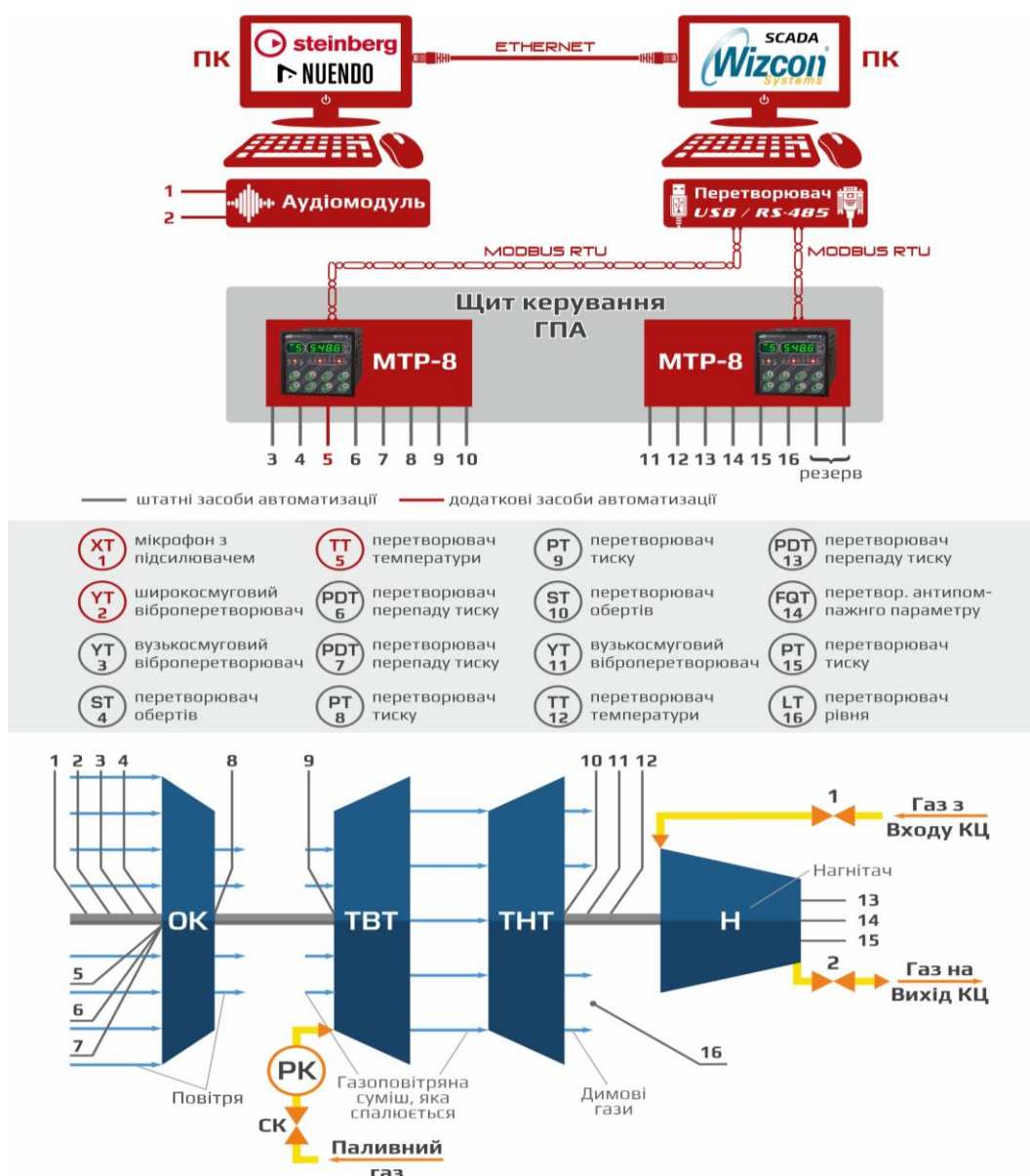
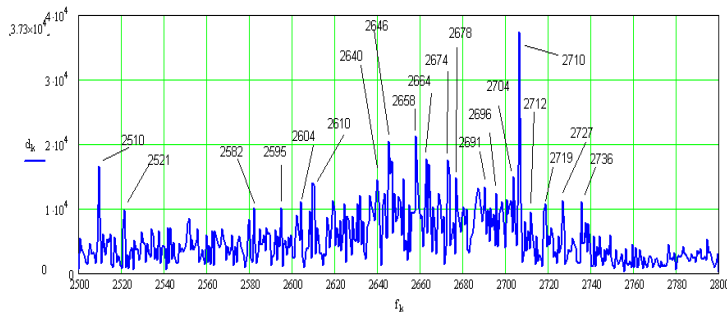


Рис. 1. Структурна схема системи контролю технологічних параметрів та віброакустичних процесів, що супроводжують роботу ГТК-25і

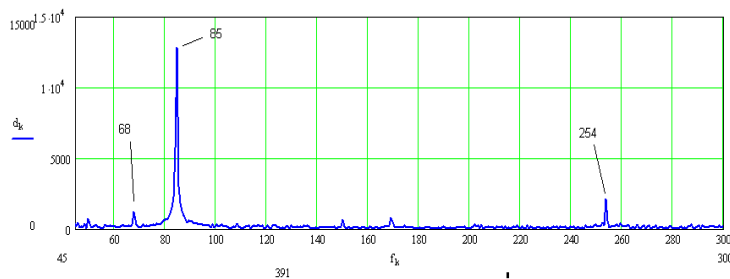
Результати проведених досліджень показали, що акустичні коливання є більш інформативними, вони характеризуються широким неперервним спектром з окремими дискретними складовими. Склад спектру, його амплітудно-частотна характеристика має велике діагностичне значення для стану агрегату. Аналіз вібростану ГТК-25і №3 після 1032 годин напрацювання показав, що простежити закономірності зміни амплітуд гармонік лопатевих частот по ступенях ОК, тобто вибрати діагностичні ознаки для оцінки його технічного стану, не представляється можливим. У той же час чітко простежується зростання рівня амплітуди 3-ої гармоніки по окремим ступеням ОК: по 0, 1, 2-ій на 58,33%, по 3 ступені на 9,73%, по 4 ступені на 14,56% і по 5 і 15 ступенях - на 6,25%. Тобто найбільш чутливими до зміни технічного стану є 0,1,2 ступені та 4 ступень. На рис. 2 приведені АЧХ акустичного і вібраційного сигналів лопатей 1-ої ступені ОК ГТК-25і №3, на яких чітко простежуються значні рівні амплітуд (f_n 0, 1, 2 = 2710 Гц при $N_0 = 5085$ об/хв.).

Як видно з рис. 2 акустичні коливання є більш інформативними, характеризуються широким безперервним спектром з гармонічними і субгармонічними складовими лопатевих частот ступенів ОК і окремими спектральними складовими з амплітудами досить високого рівня.

В розділі розглянуті також статистичні характеристики акустичних коливань ГТК-25і, для трьох його станів - «номінального», «поточного та «дефектного» з метою отримання вхідних даних для побудови ШНМ. В роз. 2.4 було прийнято



а



б

Рис. 2. АЧХ: а-акустичного, б-вібраційного сигналів 1-ої ступені ОК ГПА ГТК-25і №3

використати значення п'яти амплітудних максимумів спектра і їх порядкових індексів по кожній з вибірок для трьох станів ГТК-25і при побудові ШНМ. Вибір амплітудних максимумів спектра проводили з використанням функції для сортування значень масиву по зростанню sorted і для сортування індексів значень Sorting Indices програмного пакету MatLab. В результаті обробки отримали матрицю, в яку занесено максимуми порядкових індексів усіх малих вибірок для значень акустичного сигналу по трьох станах ГТК-25і, що будуть використані при побудові ШНМ. В загальному було зібрано 10339

зразків акустичного сигналу для «номінального» стану, 25033 зразків для «поточного» стану та 1506 зразків по «дефектного стану» ГТК-25і.

В четвертому розділі розглянуто розроблені методи діагностування технічного стану ГТК-25і. Проведена експериментальна перевірка методу діагностування САУ, теоретичні передумови якого розглянуто в роз. 2.

З використанням розробленої в роз. 3.1 методики були зняті розгінні характеристики ГТК-25і, обробка яких дозволила отримати нормовані функції передачі для його технологічних параметрів. Як приклад, на рис. 3 наведена нормована перехідна характеристики ГТК-25і по частоті обертання ротора ТВТ

$$w(s) = \frac{b_1 s + 1}{a_2 s^2 + a_1 s + 1},$$

де $a_1 = 198,1189c$, $a_2 = 14011,6064c^2$; $b_1 = 13,8991c$.

Було визначено нормовані передавальні функції та їх параметри для дев'яти розгінних характеристик, аналіз яких показав, що з плином часу змінюється структура і параметри передавальної функції, яка може бути наслідком зміни технічного стану САУ ГПА. Обчислені значення S_f їх площ були занесені в таблицю 1, та побудовано графік $S_f(t)$ (рис. 5), з якого видно, що з плином часу відбулося зростання значень площ S_f .

Таблиця 1 - Значення площ S_f у функції часу t .

Місяці	03	05	06	07	08	09	10	11	12
S_f	302, 04	288, 87	294, 33	293, 66	270, 32	272, 73	311, 32	576, 80	570, 45

Експериментальні дані (рис. 4) описали емпіричною моделлю, яку вибрали у вигляді полінома третьої степені. Для визначення її параметрів скористалися методом найменших квадратів.

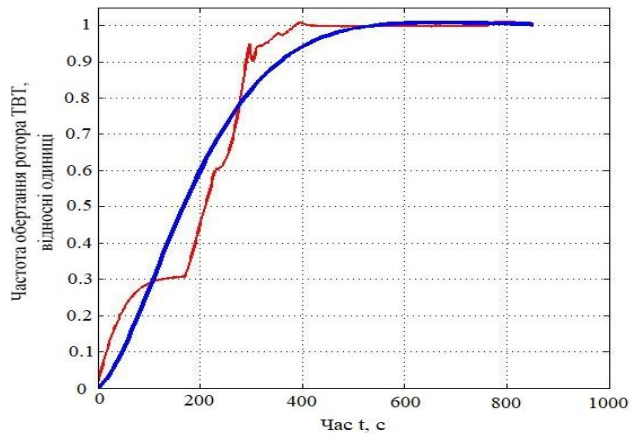


Рис. 3. Нормована перехідна характеристики ГПА в координатах «час – частота обертання ротора ТВД» та її апроксимація

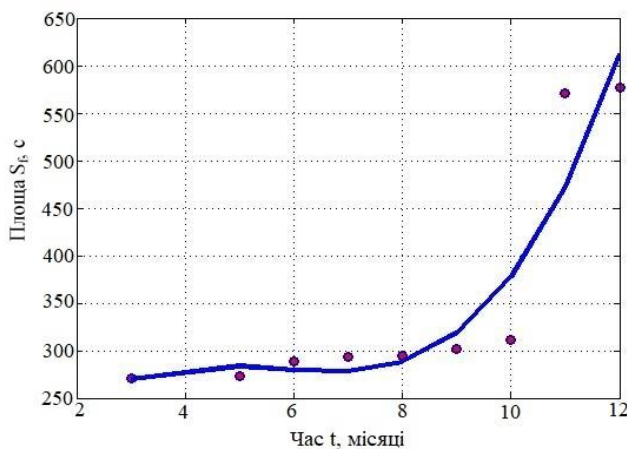


Рис. 4. Зміна значень діагностичної ознаки S_f у часі

$$S_f(t) = \pi_0 + \pi_1 t + \pi_2 t^2 + \pi_3 t^3 \quad (5)$$

В результаті були отримані такі значення параметрів емпіричної моделі (5): $\pi_0=68,08$; $\pi_1=124,17$; $\pi_2=23,09$; $\pi_3=1,38$.

Графік залежності (5) нанесений на рис. 4, показує, що значення S_f до $t \leq 10$ міс. залишається практично незмінним, а потім різко зростає до значення 570.45, що свідчить про погіршення технічного стану САУ ГПА і підтверджує ефективність запропонованого методу.

Запропонований комплексний метод діагностування технічного стану ГТК-25і, який базується на дискримінантному аналізі його технологічних параметрів та вібраційних і акустичних характеристик для трьох станів ГТК-25і: «номінальний» (ідентифікатор «a»="after") «дефектний» (ідентифікатор «b»="befor") та «поточний» (ідентифікатор «w»="work"). При цьому використовувалася вибірка технологічних параметрів і віброакустичних характеристик тривалістю понад 4 роки. Процедура

визначення технічного стану ГТК-25і включала дискримінантний аналіз часових реалізацій значень технологічних параметрів, записаних через кожні 30с та рівнів віброакустичних сигналів записаних через кожні 0, 2с, що представлялися як часові ряди для трьох станів ГТК-25і. Для їх статистичної обробки використовувалися можливості програмних середовищ R та Statistica. В результаті було отримано набір характеристик (Variable), за якими можна найбільш достовірно визначити стан ГТК-25і та коефіцієнти дискримінантних функцій (Classification Functions) для кожного із трьох станів. Далі процедура передбачала визначення значення дискримінантних функцій досліджуваного ГТК-25і для кожного стану та визначення стану ГТК-25і за найбільшим значенням дискримінантних функцій для нього.

Канонічний аналіз дозволяє знайти площину проєкції (набір з двох характеристик), на якій дані (діагностичні ознаки у вигляді «хмаринок») трьох станів ГТК-25і найкраще розрізняються. В системі координат LD1 - LD2 (рис.5, а) при дискримінантному аналізі 16 технологічних параметрів, чи Root1 - Root2 (рис.5, б) при дискримінантному аналізі вібраційних та акустичних характеристик ГТК-25і, діагностичні ознаки виглядають наступним чином (рис. 5). Як видно з рис. 5, дані технічні стани ГТК-25і досить добре розрізняються.

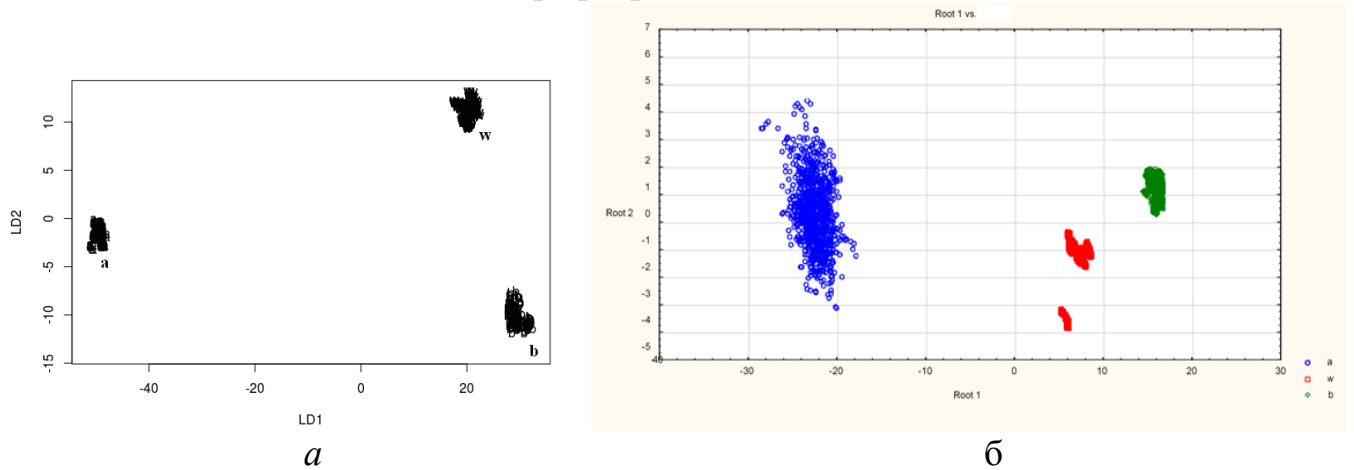


Рис. 5. Графічне представлення множини технічних станів ГТК 25і за результатами дискримінантного аналізу його а - технологічних параметрів та б - віброакустичних характеристик

Крім того, таке графічне представлення дає можливість спрогнозувати зміну його технічного стану на подальший період експлуатації та визначити час проведення ремонтних робіт. Розроблений метод діагностування технічного стану ГТК-25і є поєднанням методів параметричної і віброакустичної діагностики та не вимагає для своєї реалізації додаткових технічних засобів так, як використовує інформацію з вдосконаленої САУ ГТК-25і. Остання, в свою чергу, може використати отриману інформацію для управління процесом компримування газу з врахуванням технічного стану ГТК-25і. В розділі розглядається також використання вейвлет-перетворення для визначення діагностичної ознаки технічного стану ГТК-25і за результатами обробки віброакустичних процесів, що супроводжують його роботу, для трьох станів. Для цього, відповідно до методики досліджень, були отримані вихідні файли формату .mat з записом вібраційних і акустичних сигналів, які підлягали обробці з використанням вейвлет-перетворення. За базову функцію було вибрано симлет-вейвлет четвертого порядку (функція sum4 в середовищі MatLab). Для отримання кількісних показників залежності компонент вейвлет-перетворення від технічного стану ГПА було проведено дискретне вейвлет-перетворення, яке дозволяє виділити характерні тренди в зміні значень шуму на різних масштабах за рахунок операції розкладу на компоненти вейвлет-перетворення. На рис.6 наведено значення норми апроксимації та норми деталізації по відношенню до норми сигналу (у відсотках) для п'ятирівневого вейвлет-розкладу.

Графік на рис. 6 вказує на тенденцію до зростання діагностичної ознаки - величини норми вейвлет - складової деталізації п'ятого порядку, що описується рівнянням ($R^2 = 0,9954$) $d_5 = 0.0005t + 6.7414$, де t - напрацювання ГТК-25і в годинах.

Досліджена діагностична ознака стану ГТК-25і також дозволяє не лише діагностувати його поточний стан, але і прогнозувати зміну цього стану на подальший період експлуатації.

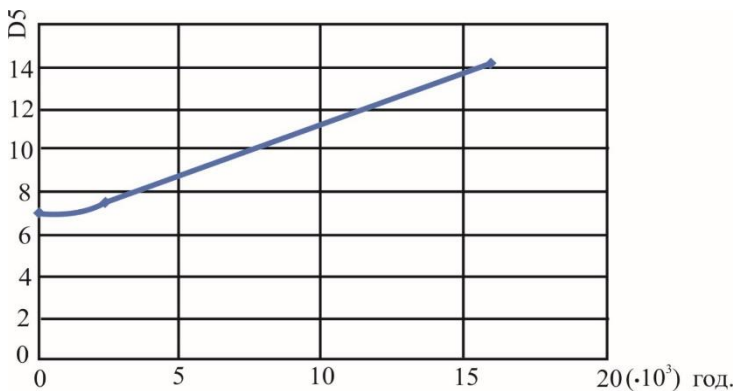


Рис. 6. Графік відношення норми вейвлет-складової деталізації п'ятого порядку до часу напрацювання ГПА

В прихованому шарі використовується ReLU функція активації, в вихідному шарі – функція SoftMax. Розглядається процедура побудови нейронної мережі з використанням фреймворків TensorFlow та Keras. Проведено її навчання на експериментальних даних для трьох станів ГТК-25і.

На рис.7 наведено графіки навчання нейромережі, з яких видно, що найкращу продуктивність системи отримаємо після 20 епох, коли досягається заданий рівень помилки для валідаційних даних. Як можна побачити, training accuracy досягає значення 0.9904, validation accuracy досягає значення 0.9746.

Використання розробленої нейро мережі дозволяє зі значенням метрики f_i не менше 0,8 розрізнити три стани ГТК-25і, а подальше навчання нейронної мережі дасть можливість прогнозувати його зміну та проводити ремонтні роботи за фактичним технічним станом ГТК-25і.

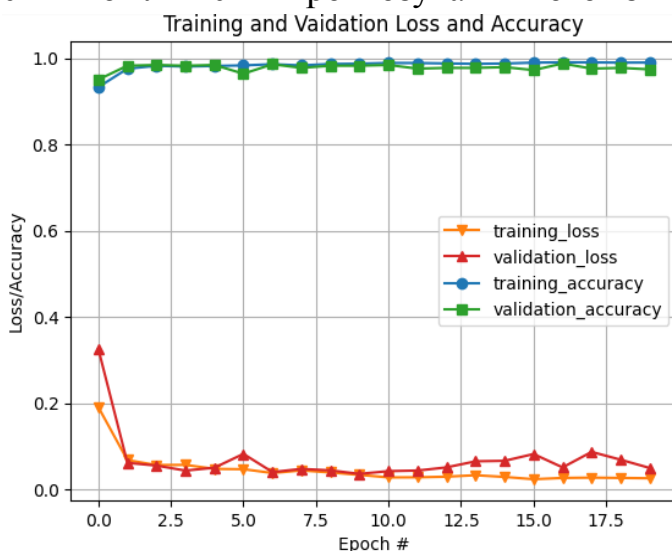


Рис. 7. Графіки навчання нейронної мережі

готовності.

Проведений розрахунок показника готовності P_e для ГТК-25і з врахуванням визначених в роз.1 його показників надійності: середнє напрацювання на відмову системи керування ГТК-25і - 6323 год, звідки $\lambda_{од} = 1.58 \cdot 10^{-4}$ 1/год, $\lambda_{тзд} = 1 \cdot 10^{-6}$ 1/год,

період експлуатації. На основі запропонованої в роз. 2 двошарової ієрархічної нейронної мережі прямого поширення, що тренується за алгоритмом зворотного поширення похибки, та отриманих в роз. 3 її вхідних даних - значеннях п'яти амплітудних максимумів спектру частот і їх порядкового індексу по кожній із вибірок, здійснена побудова нейромережі прямого поширення з двома прихованими шарами і вихідним шаром.

В прихованому шарі використовується ReLU функція активації, в вихідному шарі – функція SoftMax. Розглядається процедура побудови нейронної мережі з використанням фреймворків TensorFlow та Keras. Проведено її навчання на експериментальних даних для трьох станів ГТК-25і.

На рис.7 наведено графіки навчання нейромережі, з яких видно, що найкращу продуктивність системи отримаємо після 20 епох, коли досягається заданий рівень помилки для валідаційних даних. Як можна побачити, training accuracy досягає значення 0.9904, validation accuracy досягає значення 0.9746.

Використання розробленої нейро мережі дозволяє зі значенням метрики f_i не менше 0,8 розрізнити три стани ГТК-25і, а подальше навчання нейронної мережі дасть можливість прогнозувати його зміну та проводити ремонтні роботи за фактичним технічним станом ГТК-25і.

В розділі розглядається також задача оцінки ефективності системи діагностування САУ ГТК-25і для найбільш складного випадку - «випадково-періодичне використання ГТК-25і при випадково-періодичному діагностуванні САУ».

З врахуванням можливих переходів між визначеними станами системи було отримано граф переходів на основі якого складено систему рівнянь, розв'язок якої дозволив отримати вираз для показника

$t_{\text{вик}} = 4400$ год, $t_{\text{в}} = 4320$ год, $t_{\text{рем}}^{\text{од}} = 2, 22$ год, $t_{\text{рем}}^{\text{тзд}} = 1$ год та $t_{\text{к}} = 0.5$ год, становить $P_2 = 0.93$. Отримане значення показника готовності підтверджує ефективність розробленого методу діагностування САУ ГТК-25і.

Проведена промислова апробація розроблених методів діагностування технічного стану ГТК-25і та його САУ на КС-39 «У-П-У» Богородчанського ЛВУМГ та КС-3 «Долина» показала їх працездатність. Для визначення умов працездатності по кожній з вибраних діагностичних ознак запропонованих методів діагностування, за якими можна буде прогнозувати зупинку ГТК-25і за фактичним технічним станом, необхідно створити базу статистичного матеріалу, яка зараз знаходиться в стадії формування.

ВИСНОВКИ

У дисертації подано нове рішення науково-технічної задачі, яке полягає в розробленні методів діагностування на основі сучасних інформаційних технологій як ГПА ГТК-25, так і системи його автоматичного управління, що сприяють забезпеченню надійності їх роботи та підвищенню ефективності процесу компримування газу.

Основні результати роботи полягають в наступному:

1. Проведений аналіз сучасних тенденцій діагностування технічного стану ГПА показав відсутність системного підходу до розробки методів діагностування ГПА з САУ, у зв'язку з чим практично відсутні методи діагностування САУ ГПА, а відомі методи діагностування механічних вузлів ГПА не завжди є ефективними.

2. З використання методу параметричної ідентифікації (метод Симою) обгрунтовані теоретичні передумови методу діагностування САУ ГПА за зміною площі S , яка утворена перехідною характеристикою, як діагностичною ознакою стану САУ, що в значній мірі усуває суб'єктивний фактор в обчисленні параметрів передавальної функції, а також обгрунтовано використання для діагностування стану ГТК-25і двошарової ієрархічної нейронної мережі прямого поширення, що тренується за алгоритмом зворотного поширення похибки та її вхідних даних – п'яти максимальних амплітудних значень спектру акустичних процесів, що супроводжують роботу ГТК-25і з «номінальним», «поточним» та «дефектним» станами, і їх порядковими індексами для кожної вибірки.

3. Розроблено методичне, технічне та програмне забезпечення для проведення експериментальних досліджень, яке дозволяє оперативно проводити комплекс досліджень та обробку отриманих даних в режимі реального часу. Отримані результати показали, що при напрацюванні 1032 год. 0, 1, 2 і 4 – ступеней ОК ГТК-25і, зміна рівня акустичного сигналу склала 58, 33% по ступеням 0, 1, 2, а по 4 ступені - 14, 56%, що дозволяє використовувати їх в якості діагностичних ознак при контролі технічного стану ГТК-25і. Дослідження статистичних характеристик акустичних сигналів для трьох станів ГТК-25і показали, що вони характеризуються нормальним законом розподілу, а обробка статистики по спектрам акустичних сигналів дозволила обгрунтувати вибір вхідних даних при побудові нейронної мережі.

4. З використанням сучасних інформаційних технологій для обробки технологічних параметрів та віброакустичних процесів, що супроводжують роботу ГТК-25і – дискримінантного аналізу, Wavelet - перетворень і штучних нейронних

мереж розроблені та апробовані на експериментальних даних:

- метод діагностування САУ ГТК-25і за значеннями площ його розгінних характеристик, як діагностичних ознак технічного стану САУ, апробація якого на експериментальних даних підтвердила його ефективність;

- комплексний метод діагностування технічного стану ГТК-25і, що базується на визначенні найбільших значень дискримінантних функцій (діагностичних ознак) досліджуваного ГТК-25і для кожного з його трьох технічних станів за 16 технологічними параметрами та вібраційними і акустичними характеристиками;

- метод діагностування стану ГТК-25і, діагностичною ознакою якого є величина норми вейвлет-складової деталізації п'ятого порядку D5, отримана шляхом обробки акустичних процесів, що супроводжують роботу ГТК-25і, і зміна якої в часі описується лінійною залежністю, що дозволяє прогнозувати технічний стан ГТК-25і на подальший період його експлуатації;

- штучна нейронна мережа прямого поширення з входною розмірністю 12, двома прихованими шарами, що містять 256 і 128 нейронів відповідно та вихідним шаром, що містить 3 нейрони, яка пройшла навчання на експериментальних даних - п'яти амплітудних максимумів спектра і їх порядкових індексах по кожній з вибірок, результати якого дозволяють зі значенням метрики f_i не менше 0,8 розрізнити три технічні стани ГТК-25і.

5. Розглянута процедура визначення показника готовності на основі статистичних даних по відмовах САУ ГТК-25і, розраховане значення якого становить $P_z=0.93$, що підтверджує ефективність розробленого методу діагностування САУ ГТК-25і.

ПЕРЕЛІК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ

1. Research of the characteristics of acoustic processes using wavelet transformation for detecting a diagnostic sign of the technical state of gas pumping units. Zamikhovskiy L., Zamikhovska O., Pavlyk V. Technology audit and production reserves, 2021. № 1/2(57). P. 6-12. DOI: 10.15587/2706-5448.2021.224432 (*Фахове видання, Index Copernicus*).

2. Development method for estimating the technical condition of gas pumping units by their accelerating characteristic. M. Gorbiychuk, O. Zamikhovska, L. Zamikhovskiy, V. Pawlyk. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. № 3/2 (105). 2020. P. 48 – 57 (*Фахове видання, Scopus*).

3. Заміховський Л. М. Удосконалення системи автоматичного управління газоперекачувальними агрегатами з врахуванням їх технічного стану. Л. М. Заміховський, О. Л. Заміховська, Н.І. Іванюк, В.В. Павлик. Нафтогазова енергетика. 2020. № 2(34). С. 84-95 (*Фахове видання*).

4. Заміховський Л. М. Методика контролю технічного стану газоперекачувального агрегату ГТК-25і в процесі експлуатації. Л.М. Заміховський, О.Л. Заміховська, В.В. Павлик. Науковий вісник ІФНТУНГ. 2020. № 2(49). С. 106-116 (*Фахове видання*).

5. Заміховський Л. М. Исследование диагностических признаков технического состояния газоперекачивающих агрегатов ГТК-25і фирмы Нуово-Пиньоне. Л. М. Заміховський, В.В. Павлык. Молодой ученый. 2014. №15(74). С. 75-79. (*Index Copernicus*).

6. Заміховський Л. М., Павлик В. В. Дослідження вібраційного стану осевого компресора ГПА ГТК 25і фірми «Нуово Пінйоне». Методи і прилади контролю якості. 2014. № 1(32). С.28-38 (*Фахове видання*).
7. Павлик В.В. Напрямки підвищення ефективності експлуатації газоперекачувальних агрегатів в умовах Богородчанського ЛВУМГ. В.В. Павлик. Наукові вісті Галицької Академії. № 2(22). Івано-Франківськ, 2012. С.44-49.
8. Павлик В.В. Контроль стану повітряних фільтрів осевого компресора В. В. Павлик, І.М. Вовк. Трубопровідний транспорт. № 2(80). 2013.С.30-31.
9. Павлик В.В. Модернізація ГТС. Зроблено в Україні. В. В. Павлик, З. Й. Концур, І.М. Вовк, В.В. Дихнілкін. Журнал «Мир Автоматизации» №3(37).2012.С.84-88.
10. Павлик В.В. Епоха модернізації: модернізація загальностанційної системи керування КС-21 «Союз»; створення інформаційно – вимірювально системи на КС-7 магістрального газопроводу «К-А-Ч-Б» Богородчанського ЛВУМГ. В. В. Павлик, З. Й. Концур, Б. Ф. Труфан. Трубопровідний транспорт. № 4 (64).2010. С. 16-18.
11. Павлик В. В. Організація комп'ютеризованого контролю рівня охолоджувальної рідини в розширювальних баках ГПА (газоперекачувальних агрегатів) ГТК 10-і. В.В. Павлик, З. Й. Концур. Трубопровідний транспорт. № 4(54). 2008. С. 20-21.
12. Павлик В.В. Модернізація реєструючих пристроїв, систем керування на КС (компресорній станції) №39 газопроводу «Уренгой-Помари-Ужгород» Богородчанського ЛВУМГ. В. В. Павлик, І. М. Вовк, В. Я. Вигодованок. Трубопровідний транспорт». № 4(54). 2008.С. 21-23.
13. Павлик В.В. Модернізація системи обліку паливно-пускового газу на КС №21 газопроводу «Союз». В.В. Павлик. Інформаційний огляд ДК «Укртрансгаз», 2000. № 3(5). 6 с.
14. Estimation of the readiness indicator of the diagnostic system of gas-pumping units. L. Zamikhovskyi, S. Zikratyi, N. Ivanyuk, V. Pawlyk. Science and education: problems, prospects and innovations. Abstracts of the 3rd International scientific and practical conference. CPN Publishing Group. Kyoto, Japan. 2020. P. 134-139.
15. A complex approach to the development of methods of control and diagnosis of the technical condition of gas pumping units. L. Zamikhovskyi, N. Ivanyuk, O. Mirzoieva, V. Pawlyk. The 10th International scientific and practical conference “Dynamics of the development of world science” (June 10-12, 2020) Perfect Publishing, ISBN 978-1-4879, Vancouver, Canada. 2020. P. 215-224.
16. Zamikhovskyi L. Diagnosing the technical condition of the gas pumping unit type ГТК-25 on the basis of modern information technologies. L. Zamikhovskyi, V. Pawlyk. Open conference systems, innovative ideas in science 2017. 2018. Режим доступу до ресурсу: <http://conf.cunbm.utcluj.ro/index.php/iis/iis2018/author/submission/262>.
17. Заміховський Л. М. Контроль технічного стану газоперекачувальних агрегатів на базі штучних неймереж. Л. М. Заміховський, В. В. Павлик. Нафтогазова енергетика - 2017: Міжнародна науково-технічна конференція, Івано-Франківськ, 15-19 травня 2017 р. С. 317-318.
18. Zamikhovskyi L. Methods of diagnosing the technical state of the gas-pumping unit ГТК -25I of Nuovo Pignone company. L. Zamikhovskyi, V. Pawlyk. Open conference

systems, innovative ideas in science 2017. Banja Luka on 02 - 03 November 2017, Bosnia and Herzegovina.2017. Режим доступу до ресурсу: <http://conf.cunbm.utcluj.ro/index.php/iis/iis2017/paper/view/233>.

19. Заміховський Л.М. Використання вейвлет-перетворення для визначення технічного стану газоперекачувальних агрегатів. Л.М. Заміховський, Н.І. Іванюк, В.В. Павлик. Сучасні прилади, матеріали і технології для неруйн. контролю і техн. діагност. машинобуд. і нафтогазопром. обладн.: VIII Міжнар. наук.-техн. конф., Івано-Франківськ, 14-16 листопада 2017р. С.132-133.

20. Заміховський Л.М. Дослідження технічного стану ГПА ГТК 25і методами дискримінантного аналізу. Л.М. Заміховський, В.В.Павлик. Вимірювання, контроль та діагностика в технічних системах: IV Міжнародна наукова конференція, Вінниця, 31 жовтня - 02 листопада 2017 р. С.258-259.

21. Заміховський Л. М. Використання дискримінантного аналізу для вибору діагностичної ознаки технічного стану газоперекачувальних агрегатів ГПА. Л. М. Заміховський, В.В. Павлик. Summer Info Com 2017: Матеріали IV Міжнародної науково-практичної конференції, м. Київ, 1-2 червня 2017р. К.: Вид-во ТОВ «Інжиніринг», 2017. С. 32-33.

22. Заміховський Л.М. Дослідження статистичних характеристик параметрів ГПА ГТУ - 25і . Л.М. Заміховський, В.В. Павлик. Вимір., контр. та діагност. в техн. системах: III-а Міжнар. наук. конф., Вінниця, 27-29 жовтня 2015 р. С. 145-146.

23. Заміховський Л. М. Контроль вібраційного стану осьового компресора. Л. М. Заміховський, В. В. Павлик. Нафтогазова енергетика 2013: Міжнародна науково-технічна конференція, Івано-Франківськ, 07-11 жовтня 2013 р. С.249-250.

24. Заміховський Л.М. Дослідження діагностичних ознак вібраційного стану осьового компресора ГТК 25і. Л. М. Заміховський, В. В. Павлик. Вимірювання, контроль та діагностика в технічних системах: II-а Міжнародна наукова конференція, Вінниця, 29-30 жовтня 2013 р. С. 74.

25. Заміховський Л.М. Модернізація, підвищення надійності роботи агрегатних, загальностанційних систем автоматичного керування на газоперекачувальних компресорних станціях, організація сучасного моніторингу, діагностики стану технологічного обладнання. Л. М. Заміховський, В.В. Павлик. Проблеми і перспективи транспортування нафти і газу: матеріали Міжн. наук.-техн. конф. 15-18 трав. 2012р. – Івано-Франківськ : ІФНТУНГ, 2012. С. 105-106.

26. Заміховський Л.М. Діагностування технічного стану газоперекачувальних агрегатів в процесі експлуатації. Л. М. Заміховський, В. В. Павлик, Н. І. Іванюк. Вчені Прикарпаття – сталому розвитку краю: обласна науково-практична конференція.Збірник тез доповідей. Івано-Франківськ, 2012. С. 81-84.

27. Заміховський Л.М. Контроль технічного стану осьового компресора газоперекачувального агрегата. Л. М. Заміховський, В. В. Павлик. Вимірювання, контроль та діагностика в технічних системах: I Міжнародна наукова конференція, Вінниця, 18-20 жовтня 2011 р. С. 97.

АНОТАЦІЯ

Павлик В. В. Комплексний метод та система контролю технічного стану газоперекачувальних агрегатів великої потужності. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.11.13 – прилади і методи контролю та визначення складу речовин. – Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу, м. Івано-Франківськ, 2021.

Проаналізовано переваги і недоліки методів діагностування ГПА з САУ та обґрунтована можливість використання методів ідентифікації об'єктів, а також сучасних інформаційних технологій щодо обробки віброакустичних процесів для вирішення поставлених в роботі задач.

Розроблені теоретичні засади методу діагностування технічного стану САУ ГТК-25і за їх розгінними характеристиками. При цьому технічний стан САУ ГПА визначається за зміною площі, яка утворена перехідною характеристикою і є діагностичною ознакою, зміна якої характеризує зміну технічного стану ГПА.

Для визначення технічного стану ГТК-25і запропоновано використати двошарові ієрархічні нейронні мережі прямого поширення, що тренуються за алгоритмом зворотного поширення похибки, а моделювання «дефектного» та «номінального» станів проводити на основі отриманих результатів вимірювання і обробки характеристик акустичних процесів, які генеруються ГПА в процесі експлуатації.

Досліджені статистичні характеристики акустичних процесів ГТК-25і та визначені діагностичні ознаки, які можуть бути покладені в основу методів контролю його технічного стану.

За результатами експериментальних досліджень розроблені: метод параметричної діагностики технічного стану ГТК-25і, що базується на визначенні найбільших значень дискримінантних функцій досліджуваного ГТК-25і для кожного з його технічних станів за 16 технологічними параметрами; метод, діагностичною ознакою якого є величина норми вейвлет-складової деталізації п'ятого порядку D5, отримана шляхом обробки акустичних процесів супроводжуючих роботу ГТК-25і; штучна нейронна мережа, яка пройшла навчання на експериментальних даних, результати якого дозволяють чітко розрізнити два стани «незадовільний» та «номінальний».

Розглянута процедура визначення показника готовності на основі статистичних даних по відмовах САУ ГТК-25і та розраховане його значення $P_c = 0.93$, що підтверджує ефективність розробленого методу діагностування САУ ГТК-25і.

Ключові слова: методи діагностування, діагностична ознака, технічний стан, розгінна характеристика, експериментальні дані, ГПА, САУ, штучні нейронні мережі, вейвлет-перетворення, дискримінантний аналіз, акустичний процес, система діагностування.

АННОТАЦИЯ

Павлик В. В. Комплексный метод и система контроля технического состояния газоперекачивающих агрегатов большой мощности. – Квалификационный научный труд на правах рукописи.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.11.13 - приборы и методы контроля и определения состава веществ. - Ивано-Франковский национальный технический университет нефти и газа, г. Ивано-Франковск, 2021.

Проанализированы преимущества и недостатки методов диагностирования ГПА с САУ и обоснована возможность использования методов идентификации объектов, а также современных информационных технологий по обработке виброакустических процессов для решения поставленных в работе задач.

Разработаны теоретические основы метода диагностирования технического состояния САУ ГТК-25i по их разгонным характеристикам. При этом техническое состояние САУ ГПА определяется изменением площади, образованной переходной характеристикой, являющейся диагностическим признаком, изменение которого характеризует изменение технического состояния ГПА.

Для определения технического состояния ГТК-25i предложено использовать двухслойные иерархические нейронные сети прямого распространения, тренирующиеся по алгоритму обратного распространения ошибки, а моделирование «дефектного» и «номинального» состояний проводить на основании полученных результатов измерения и обработки характеристик акустических процессов, генерируемых ГПА в процессе его эксплуатации.

Исследованы статистические характеристики акустических процессов ГТК-25i и определены диагностические признаки, которые могут быть положены в основу методов контроля его технического состояния.

По результатам экспериментальных исследований разработаны: метод параметрической диагностики технического состояния ГТК-25i, основанный на определении наибольших значений дискриминантных функций исследуемого ГТК-25i для каждого из его технических состояний за 16 технологическими параметрами; метод, диагностическим признаком которого является величина нормы вейвлет-составляющей детализации пятого порядка D5, полученная путем обработки акустических процессов, сопровождающих работу ГТК-25i; искусственная нейронная сеть, которая прошла обучение на экспериментальных данных, результаты которого позволяют четко различить два состояния «дефектное» и «номинальное».

Рассмотрена процедура определения показателя готовности основанная на статистических данных по отказам САУ ГТК-25i и рассчитано его значение $P_2 = 0.93$, которое подтверждает эффективность разработанного метода диагностирования САУ ГТК-25i.

Ключевые слова: методы диагностики, диагностический признак, техническое состояние, разгонная характеристика, экспериментальные данные, ГПА, САУ, искусственные нейронные сети, вейвлет-преобразования, дискриминантный анализ, акустический процесс, система диагностирования.

ABSTRACT

Pawlyk V. V. **An integrated method and system for monitoring the technical condition of high-capacity gas-pumping units.** - Qualifying scientific work as a manuscript.

Thesis for the degree of candidate of technical sciences in specialty 05.11.13 - devices and methods for monitoring and determining the composition of substances. - Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas, Ivano-Frankivsk, 2021.

The advantages and disadvantages of methods for diagnosing a gas pumping unit with an automatic control system are analyzed, the absence of a systematic approach to their development is established and the possibility of using methods for identifying objects, as well as modern information technologies for processing vibroacoustic processes when modernizing existing and developing new diagnostic methods for a gas pumping unit with an automatic management. The theoretical foundations of the method for diagnosing the technical state of the GTK-25-I automatic control system and by their acceleration characteristics have been developed. In this case, the technical state of the automatic control system of the gas pumping unit is determined by the change in the area formed by the transient characteristic and is a diagnostic feature that characterizes the change in the technical state of the gas pumping unit. To determine the technical state of GTK-25-i, it is proposed to use two-layer hierarchical neural networks of feedforward propagation, training according to the error backpropagation algorithm, and modeling the "defective" and "nominal" states based on the obtained measurement results and processing the characteristics of acoustic processes generated by the gas pumping unit in during operation. Methodological, technical and software support has been developed for conducting experimental studies, taking into account the peculiarities and operating conditions of the GTK-25-i, the selection and installation of additional sensors of technological parameters is justified, an acoustic monitoring system of its state and a complex software package for monitoring the state of the GTK-25-I have been done.

The statistical characteristics of the acoustic processes of GTK-25-I certain diagnostic features that can be used as the basis for methods for monitoring its technical condition have been investigated. Based on the results of experimental studies, the following have been developed: a method for parametric diagnostics of the technical state of GTK-25-I, based on the determination of the highest values of the discriminant functions of the GTK-25-I under study and for each of its technical states for 16 technological parameters; method, the diagnostic feature of which is the value of the norm of the wavelet component of the fifth-order detailing D_5 , obtained by processing the acoustic processes accompanying the operation of the GTK-25-I; an artificial neural network that was trained on experimental data, the results of which make it possible to clearly distinguish between two states "unsatisfactory" and "nominal". The procedure for determining the readiness indicator on the basis of statistical data on failures of the GTK-25-i automatic control system is considered and its value $R_i = 0.93$ is calculated, which confirms the effectiveness of the developed method for diagnosing the GTK-25-i automatic control system.

Key words: diagnostic methods, diagnostic feature, technical condition, acceleration characteristic, experimental data, gas pumping unit, automatic control system, artificial neural networks, wavelet transformations, discriminant analysis, acoustic process, diagnostics system.