

ВІДГУК

офіційного опонента на дисертацію Павлика Володимира Васильовича "Комплексний метод та система контролю технічного стану газоперекачувальних агрегатів великої потужності", поданої на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.11.13 – прилади і методи контролю та визначення складу речовин.

Актуальність обраної теми

На трансконтинентальному газопроводі «Уренгой - Помари-Ужгород», який з'єднує сибірські і уральські газові родовища з індустріальною Європою та проходить через територію України встановлено 40 компресорних станцій (КС), з 120 газоперекачувальними агрегатами (ГПА) потужністю 25 МВт кожен. Серед них абсолютну більшість становлять ГПА ГТК-25і італійської фірми «Нуово-Пінйоне», які встановлені на початку 80-х років минулого століття.

Сьогодні більше 60% ГПА ГТК-25і відпрацювали встановлений моторесурс, або близькі до нього, тому їх подальша експлуатація не забезпечує надійної і ефективної роботи, у зв'язку з чим виникають багаточисельні відмови та зупинки, що призводять до зриву контрактних зобов'язань.

Враховуючи, що разом з ГТК-25і поставлялися релейно-аналогові 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. Тема дисертаційної роботи є частиною планових науково-дослідних програм із розвитку газотранспортної системи України і є надзвичайно актуальною, зокрема через можливість використання експортних газопроводів в реверсному режимі та для закачування-відбору природного газу з підземних сховищ.

Ступінь обґрунтованості та достовірності наукових положень, висновків і рекомендацій

Дослідження, які проведено в наданій для рецензування дисертаційній роботі, мають належний ступінь обґрунтованості. Припущення і положення, на яких ґрунтується побудова запропонованих методів і засобів технічної діагностики є достатньо зваженими та коректними.

Запропоновані в дисертації методи діагностування на основі сучасних

програмно-технічних засобів ГПА ГТК-25і та системи його автоматичного управління, обґрунтовано шляхом проведення розрахункових та практичних досліджень на виробничих об'єктах.

Відповідно метою роботи, на основі поставлених здобувачем завдань, було розробка комплексу методів параметричної та віброакустичної діагностики ГПА великої потужності та методу діагностування САУ, а також програмно-технічних засобів для їх реалізації, використання яких дозволить отримувати оперативну і достовірну інформацію про технічний стан технологічного обладнання ГПА з САУ в процесі експлуатації та проводити ремонтні роботи за фактичним технічним станом.

Достовірність отриманих результатів забезпечена ефективним застосуванням методів технічної діагностики, основних положень віброакустичної діагностики технологічного обладнання, методів теорії надійності і математичної статистики, методів ідентифікації об'єктів, методів спектрального і дискримінантного аналізу, методів вейвлет-перетворень експериментальних даних. При розробці технічного забезпечення використовувались методи системо- і схемотехніки, а при розробці програмного забезпечення – методи об'єктно-орієнтованого програмування.

Якість отриманих результатів підтверджується експериментальними дослідженнями газоперекачувального обладнання, а також відповідністю результатів теоретичних і експериментальних досліджень. Наукові положення дисертації мають належне відповідне теоретичне обґрунтування. Матеріали дисертаційної роботи представлені на 15-ти міжнародних та вітчизняних наукових конференціях.

Стислий зміст дисертаційного дослідження

Дисертаційна робота складається із вступу, 4-х розділів, 49-ти рисунків, 24-х таблиць, списку 106-ти використаних джерел, висновків, 8-ми додатків з актами впровадження результатів наукових досліджень у навчальний процес та виробництво.

У **вступі** визначені мета та завдання дослідження, визначені наукові та практичні задачі, актуальність, сформульовано об'єкт, предмет та методи

досліджень, наведено наукову новизну та практичне значення досліджень, особистий внесок здобувача у публікаціях, які виконано у співавторстві, апробацію роботи, кількість та якість публікацій по темі досліджень.

У першому розділі проведений аналіз конструктивних особливостей ГТК-25і з точки зору контролепридатності та встановлено недостатню кількість проектних засобів контролю для забезпечення ефективного діагностування його технічного стану. Розглянуто основні причини дефектів обладнання ГПА в процесі експлуатації, встановлено, що більшість аварійних зупинок і тривалих вимушених простоїв пов'язані з відмовами, пошкодженнями механічного обладнання. 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 %.

Проаналізовано обстеження САУ на КС, які експлуатуються на основних експортних магістральних газопроводах, встановлено, 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 механічного обладнання ГПА дослідники основну увагу приділяють 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.

Встановлено відсутність системного підходу 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. Запропоновано вирішення вказаної задачі на основі методів параметричної ідентифікації. Вони передбачають проводити оцінку стану динамічної системи, якою є ГПА з САУ, на основі аналізу її перехідного процесу при деякому типовому входному 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 технічний стан САУ ГПА визначається за зміною площі, яка утворена перехідною характеристикою і є діагностичною ознакою, зміна якої характеризує зміну технічного стану ГПА.

Виходячи з досвіду використання нейронних мереж для контролю та діагностування окремих вузлів ГПА та турбін, для діагностування технічного стану ГТК-25і запропоновано використати двошарові 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.

Запропонована методика передбачає 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, та здійснення акустичного контролю його роботи. Для експериментальної перевірки розробленого методу діагностування САУ ГПА за його розгінними характеристиками було організовано проведення експериментів шляхом зняття розгінних характеристик ГТК-25і при його пусках (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 побудована на базі двох комплектів 8-ми каналних мікропроцесорних реєстраторів-регуляторів типу МТР-8 до яких підключено вихідні сигнали з штатних та додаткових перетворювачів 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. 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.

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. методики були зняті розгінні характеристики ГТК-25і, обробка яких дозволила отримати нормовані функції передачі для його технологічних параметрів.

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, та побудовано графік, з якого видно, що з плином часу відбулося зростання значень площ S_f . Експериментальні дані описали емпіричною моделлю, яку вибрали у вигляді полінома третьої степені.

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. 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. Було проведено

визначення значення дискримінантних функцій досліджуваного ГТК-25і для кожного стану та визначення стану ГТК-25і за найбільшим значенням дискримінантних функцій для нього. Як видно з побудованих графіків, дані технічні стани ГТК-25і досить добре розрізняються.

Розроблено архітектуру глибинної повнозв'язної нейронної мережі прямого поширення, що тренуються за алгоритмом зворотного поширення похибки. Проведено тестування і отримано числові показники якості діагностування трьох станів ГТК-25і.

Розглянута процедура оцінки ефективності системи діагностування САУ ГТК-25і для найбільш складного випадку-«випадково-періодичне використання ГТК-25і при випадково-періодичному діагностуванні САУ» шляхом визначення показника готовності на основі статистичних даних по відмовах САУ ГТК-25і. Отримане значення показника готовності становить $P_2 = 0.93$, що підтверджує ефективність розробленого методу діагностування САУ ГТК-25і.

У висновках здобувач навів одержані в роботі нові наукові та практичні результати, визначив їх новизну та практичну значущість.

У додатках наведено технічні характеристики основних вузлів ГТК-25і, таблиці з експериментальними технологічними даними, технічні характеристики додаткових вимірювальних перетворювачів, розрахунок мікрофонного підсилювача, копії актів впровадження результатів наукових досліджень.

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 є комплексним методом, на відміну від існуючих методів параметричної і віброакустичної діагностики ГПА, та не вимагає для своєї реалізації додаткових вартісних технічних засобів так, як 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 F1 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 акустичними характеристиками, використання яких дозволяє прогнозувати момент виникнення аварійних ситуацій, пов'язаних з відмовою вузлів та елементів осьового компресора ГТК-25і;

- системи вимірювання акустичних коливань, генерованих ГТК-25і в процесі експлуатації, результати обробки яких дозволили отримати

діагностичні ознаки його технічного стану;

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

- програми обробки сигналів з системи вимірювання акустичних коливань з використанням програмного пакета Steinberg Nuendo 3.2 для подальшої детальної обробки і збереження результатів запису акустичних сигналів та ведення інформаційної бази даних, яке надалі може бути покладене в основу експертної системи.

Розроблені методи контролю і діагностування пройшли промислово 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».

Повнота викладення наукових положень, висновків і рекомендацій в опублікованих працях

За результатами досліджень, які викладені в дисертації, опубліковано 27 робіт, з яких 5 - у виданнях, включених ДАК України до переліку фахових видань, 3 входять до міжнародних науко-метричних баз Scopus, Index Copernicus, 15 - у збірниках матеріалів вітчизняних та міжнародних наукових конференцій.

Всі положення та результати дисертації отримані здобувачем особисто і повністю викладені в опублікованих наукових роботах.

Зміст автореферату у повній мірі відповідає змістові дисертації.

Зауваження

Відзначаючи якість представленої дисертаційної роботи, а також повноту та новизну отриманих здобувачем наукових та практичних результатів, вважаю за необхідне надати наступні зауваження:

1. Сумнівний вибір в якості складника стаціонарної системи автоматичного керування ГТК-25і програмного комплексу обробки сигналів Steinberg Nuendo, який призначений для інтерактивної роботи і зручний для проведення експериментів з участю оператора, але не для роботи в автономному режимі (рис.3.1, стор.70).

2. Необгрунтований вибір базової функції вейвлет-перетворення. В роботі вибрано симлет-вейвлет четвертого порядку, проте не проведене порівняння його з іншими типами вейвлетів (рис.4.7, с.118).

3. Схема підсилювача електретного мікрофона виконана на мікросхемі CD4007 (рис.3.3, с.72), яка являє собою просто збірку комплементарних МОН-транзисторів загального користування. Незрозумілий вибір такої мікросхеми, за наявності на ринку великої кількості спеціалізованих мікросхем для мікрофонних підсилювачів (наприклад INA163, виробництва Texas Instruments).

4. Викликає питання оптимальність вибору структури нейромережі, яка в даній конфігурації забезпечила 15 хибних спрацювань з 55 для стану «дефектний», що складає 27,3%.(с.128) Сумнівно, що таке значення слід вважати достатнім для практичного використання.

5. На стор. 85 обгрунтовується необхідність врахування відхилення частоти обертання від номінальної при визначенні характерних частот вібраційного сигналу. Однак в якості одного із вхідних сигналів для нейромережі обрано, зокрема, порядкові індекси амплітудних максимумів спектру вібраційного сигналу (стор. 99), які, відповідно, будуть зміщуватись при зміні частоти обертів. Більш доцільно було використати відносні частоти, наприклад, отримані шляхом ділення на поточну частоту обертів.

6. Необгрунтовано вибір часової точки відокремлення станів «номінальний» та «поточний» ГПА. В роботі, фактично, довільним чином

обрано єдину точку 2500год для характеристики всієї множини «поточних» станів, при тому що «дефектному» стану відповідає напрацювання 16000 годин. Це суттєво зменшує обсяг інформативних даних і достовірність зроблених висновків.

7. В роз. 3.1 на ст. 68 вказано, що зміна поточних значень технологічних параметрів під час запусків ГПА контролювалася та реєструвалася за допомогою додатково змонтованих в щитах керування ГПА контролерів МТР-8 та спеціально адаптованих програмних пакетів Wizcon з інтервалом 0,1 сек. В той же час відсутнє обґрунтування такої частоти дискретизації технологічних параметрів роботи ГПА. Чим зумовлений вибір такої частоти?

8. Здобувач заявляє (ст.75), що розроблене додаткове програмне забезпечення вдосконаленої САУ на базі SCADA - програми Wizcon 8.3, однак з подальшого опису блок-схеми SCADA WIZCON (рис. 3.8) не зовсім зрозуміло, що саме розроблено здобувачем (драйвер, програма і ін.)

Вважаю, що наведені зауваження не впливають на загальну позитивну характеристику дисертаційної роботи здобувача, і не зменшують її актуальності, наукової новизни та практичної значимості.

Висновок

Дисертаційна робота Павлика В.В. є завершеною науково-дослідницькою працею, в якій отримано нові науково-обґрунтовані результати, що в сукупності вирішують науково-прикладну задачу по розробці комплексного методу та системи контролю технічного стану газоперекачувальних агрегатів великої потужності. Дисертація відповідає вимогам п.п. 9, 11, 12 “Порядку присудження наукових ступенів і присвоєння вченого звання старшого наукового співробітника”, а її автор, Павлик В.В., заслуговує присудження йому наукового ступеня кандидата технічних наук.

Доцент кафедри комп'ютерних наук
та інформаційних систем
Прикарпатського національного університету
імені Василя Стефаника,
кандидат технічних наук, доцент

В.А. Ровінський

Відділ
зв'язку
052-03
28. 04. 2021
Учасник
секретар

