

УДК 629.7.03:658.562(045)

М.Д. Лановий, асп.

АНАЛІЗ МЕТОДІВ І КРИТЕРІЇВ ОЦІНЮВАННЯ ТЕХНІЧНОГО СТАНУ ГАЗОПЕРЕКАЧУВАЛЬНОГО АГРЕГАТУ

Національний авіаційний університет
E-mail: avia_icao@mail.ru

Розглянуто перспективні методи діагностики газоперекачувальних агрегатів на різних етапах їх експлуатації. Визначено найбільш оптимальний та інформативний критерій оцінювання їх технічного стану.

Рассмотрены перспективные методы диагностики газоперекачивающих агрегатов на различных этапах их эксплуатации. Определен наиболее оптимальный и информативный критерий оценки их технического состояния.

In the article we have observed perspective methods of diagnostic gas-compressor units at various stages of their maintenance phase and the optimal and informative assessment criterion of their technical state.

Постановка проблеми

Газотранспортна система посідає особливе місце серед промислових систем та об'єктів України, оскільки вона забезпечує безперебійне постачання природного газу населенню, промисловим об'єктам та здійснює безперервний і безперебійний транзит природного газу до країн Центральної і Західної Європи. Показник надійності газотранспортної системи в цілому і газоперекачувального агрегату (ГПА), як складової цієї системи, повинен постійно підтримуватись на високому рівні.

З початку 90-х років в Україні майже не оновлювали основні фонди газотранспортної системи, тому актуальною проблемою є підтримання показника надійності на високому рівні. Це призвело до того, що подальша експлуатація наявного технологічного устаткування зумовлює до створення аварійних ситуацій. Оскільки надійність пов'язана з появою несправностей та виникненням відмов, то постає потреба у проведенні якісного технічного діагностування, що дає змогу оцінити технічний стан ГПА.

Аналіз досліджень і публікацій

Достовірно оцінити технічний стан ГПА можна за допомогою критерію, який найкраще інформує про наявність пошкоджень, дефектів та несправностей в системах і вузлах ГПА.

Досліджувати методи і критерії, за допомогою яких можна оцінити технічний стан ГПА, почали ще на початку 80-х років.

Класифікації методів і критеріїв наведено в роботах [1; 2], які стали своєрідним поштовхом для подальшого дослідження цього напрямку.

На основі накопиченого досвіду в роботах [3–5] описано переваги і недоліки наявних методів і критеріїв. Новий радіографічний метод наведено в роботі [6], методи, основані на комп'ютерних технологіях (комп'ютерне моделювання, системи штучного інтелекту) – роботі [7].

Велику увагу в дослідженнях і публікаціях приділяється трибодіагностиці, вібродіагностиці та методам, що ґрунтуються на одиничних параметричних критеріях.

Але напрям комплексних параметричних критеріїв розвинено недостатньо [8].

Методи визначення технічного стану газотранспортної системи

Методи оцінювання технічного стану ГПА, який перебуває в експлуатації, засновано на використанні певних критеріїв, які містять інформацію про технічний стан ГПА.

Кожен критерій характеризується певним ступенем інформативності про той чи інший дефект, пошкодження.

Залежно від використовуваних критеріїв методи оцінювання технічного стану можна класифікувати за такими критеріями [1]:

- міцності;
- накопиченням продуктів зносу в маслі;
- рівнем вібрації;
- параметричними.

Застосовуючи методи оцінювання технічного стану ГПА за критеріями міцності, визначають кінцеву довговічність матеріалів робочих і соплових лопаток, дисків турбіни, елементів камери згоряння, підшипників опор роторів тощо, за ступенем їх пошкоженості з урахуванням часу роботи на розрахункових і нерозрахункових режимах.

Довговічність і час роботи двигуна пов'язані з таким поняттям, як «еквівалентне напрацювання», яке визначається часом роботи двигуна, скоригованим на величину пошкодженості, яка залежить від термомеханічного навантаження конструктивних елементів.

Недоліком методу є складність визначення пошкодженості з урахуванням кінетики та її накопичення в процесі нестационарного навантаження.

Оцінювання технічного стану опор роторів, приводів та інших пар тертя за таким критерієм, як накопичення продуктів зносу в маслі, ґрунтується на аналізі відпрацьованого у вузлах агрегату масла (трибодіагностика).

Процес руйнування деталей у парах тертя переважно починається з руйнування поверхневого шару матеріалу під дією високих динамічних навантажень і виявляється у вигляді відривання частинок матеріалу.

Продукти зношування виносяться маслом з місць руйнування. Їх поява і накопичення у маслосистемі сигналізує про виникнення несправності.

Отже, масло можна використовувати як носій інформації про технічний стан деталей і вузлів ГПА.

Досліди показали, що відрізок часу від початку руйнування поверхневого шару до моменту повного руйнування деталі досить великий. Це дозволяє виявити несправність уже на початку руйнування.

Оцінювання технічного стану за критерієм накопичення продуктів зносу в маслі ускладнюється тим, що, крім часток матеріалу, які потрапляють у масло в результаті руйнування деталей, масло містить і продукти нормального зносу, сумарну кількість частинок зношуваних деталей, виготовлених з однакових конструкційних матеріалів.

У маслосистему можуть потрапити сторонні частинки та бруд у процесі технічного обслуговування та ремонту. Тому для отримання достовірних результатів необхідно вміти відрізнити види частинок, що наявні в маслі. А це становить певну проблему, оскільки частинки у маслі відрізняються за розмірами, формою, кольором, структурою та іншими показниками залежно від природи їх виникнення та застосовуваних матеріалів.

Найчастіше конструкція ГПА передбачає омивання маслом з одного загального маслобаку пар тертя газотурбінної установки (ГТУ) і відцентрового нагнітача (ВЦН). Тому важко визначити, руйнується пара тертя ГТУ чи ВЦН. Кількість продуктів зношування у маслі залежить від швидкості зношування.

Отже, за накопиченням продуктів зношування в маслі та інтенсивністю накопичення можна оцінити технічний стан двигуна.

Для контролю технічного стану деталей, що омиваються маслом, використовують різні методи [2]:

- полярографічний;
- калометричний;
- хімічний;
- механічний з відцентрофугуванням та фільтрацією;
- метод «плями», що ґрунтується на зміні оптичної густини масла,
- спектрометричний.

Найбільш перспективним вважається спектрометричний метод, який характеризується високою точністю і чутливістю.

За спектрометричним методом пробу масла спалюють у спеціальному пристрої, отримуючи спектр. Використовуючи цей спектр, визначають концентрацію в ньому того чи іншого складового елемента матеріалу пар тертя, за величиною якої оцінюють середню величину зношування відповідної деталі. Спектрометри дозволяють визначити вміст до 64 елементів домішок і маси частинок до 0,05 мг [3].

Широкого поширення трибодіагностика ще не одержала, але перспективним є її застосування для оцінювання працездатності підшипників кочення ГПА.

Метод оцінювання технічного стану ГПА за критерієм рівня вібрації використовують для контролю стану роторів і передач у двигуні та нагнітачі.

Рівень вібрації визначається характером збуджувальних сил, залежних від індивідуальних конструктивних особливостей конкретного двигуна (нагнітача), і експлуатаційними факторами (величиною частотою обертання ротора, температурою роторних деталей).

Під час цього будь-який дефект якогось вузла, що піддається механічному впливу з боку рухомих частин або потоку пульсуючого газу, характеризується індивідуальним вібраційним портретом.

Причинами вібрації ГТУ і ВЦН можуть бути:

- нерівномірності потоку робочого тіла або компримованого газу у проточній частині;
- дисбаланс ротора;
- порушення роботи зубчатих передач і шліцьових з'єднань;
- зменшення зусиль у деталях кріплення ротора.

Вимірювання інтегральних вібраційних характеристик дозволяє визначити загальний технічний стан. В основу нормування абсолютної вібрації покладено рекомендації міжнародних стандартів, в яких як критерій використовують середньоквадратичне значення віброшвидкості в діапазоні частот від 10 кГц до 1 кГц.

Вони ґрунтуються на припущенні, що подібні агрегати з потужністю, висотою осі обертання, частотою обертання, способом установлення, умовами монтажу та експлуатації мають приблизно однакові допустимі значення вібрації в разі досягнення граничного стану [3].

Недоліком цього методу є наявність пружних і демпферних елементів в опорах роторів, що заважає вчасно виявити дефекти, які зумовлюють незначне збільшення дисбалансу.

На сучасному етапі оцінювання технічного стану ГПА як доповнення до вібродіагностики розвивається акустичний метод. Критерієм технічного стану об'єкта є рівень шуму, його спектр, тенденція зміни, як за спектром, так і за рівнем шуму.

Одним з найбільш поширених методів є метод оцінювання технічного стану газотурбінного двигуна у процесі експлуатації за параметричними критеріями. Оскільки дефекти і несправності впливають на газодинамічні параметри, то за зміною значень цих параметрів можна оцінювати технічний стан ГТУ. Наприклад, витрата повітря через компресор зменшується в разі пошкодження лопаток осевого компресора, збільшення радіальних зазорів по проточній частині.

Залежності між несправностями, пошкодженнями та параметрами роботи ГТУ та ВЦН показано на рисунку [10]. Для спрощення схеми враховувались пошкодження, які безпосередньо впливають на зміну параметрів роботи ГПА. Вплив роботи системи автоматичного керування не враховували.

Одним з параметричних критеріїв є тренд зміни основних термогазодинамічних характеристик, який дозволяє виявляти несправності двигуна на ранній стадії їх розвитку.

Для встановлення тенденції зміни характеристик, що відображають зміну технічного стану газотурбінного двигуна, потрібно:

- застосовувати його індивідуальні характеристики;
- проводити контроль за визначених умов і режимів роботи двигуна.

Для цього застосовують автоматизовані системи контролю разом із математичними моделями, які пов'язують між собою виміряні параметри з розрахунковими.

Визначивши зміну характеристик, можна оцінювати технічний стан газотурбінного двигуна шляхом порівняння її еталонного значення зі знайденим фактичним відповідно до напрацювання.

Для розроблення методів оцінювання технічного стану ГПА широко використовуються параметричні методи, що ґрунтуються на зміні окремих параметрів, а також на встановленні залежностей між відхиленнями параметрів і несправностями, пошкодженнями відповідних елементів конструкції. Їх використовують для контролю стану проточної частини осевих, відцентрових машин, виявлення негерметичностей ущільнень тощо.

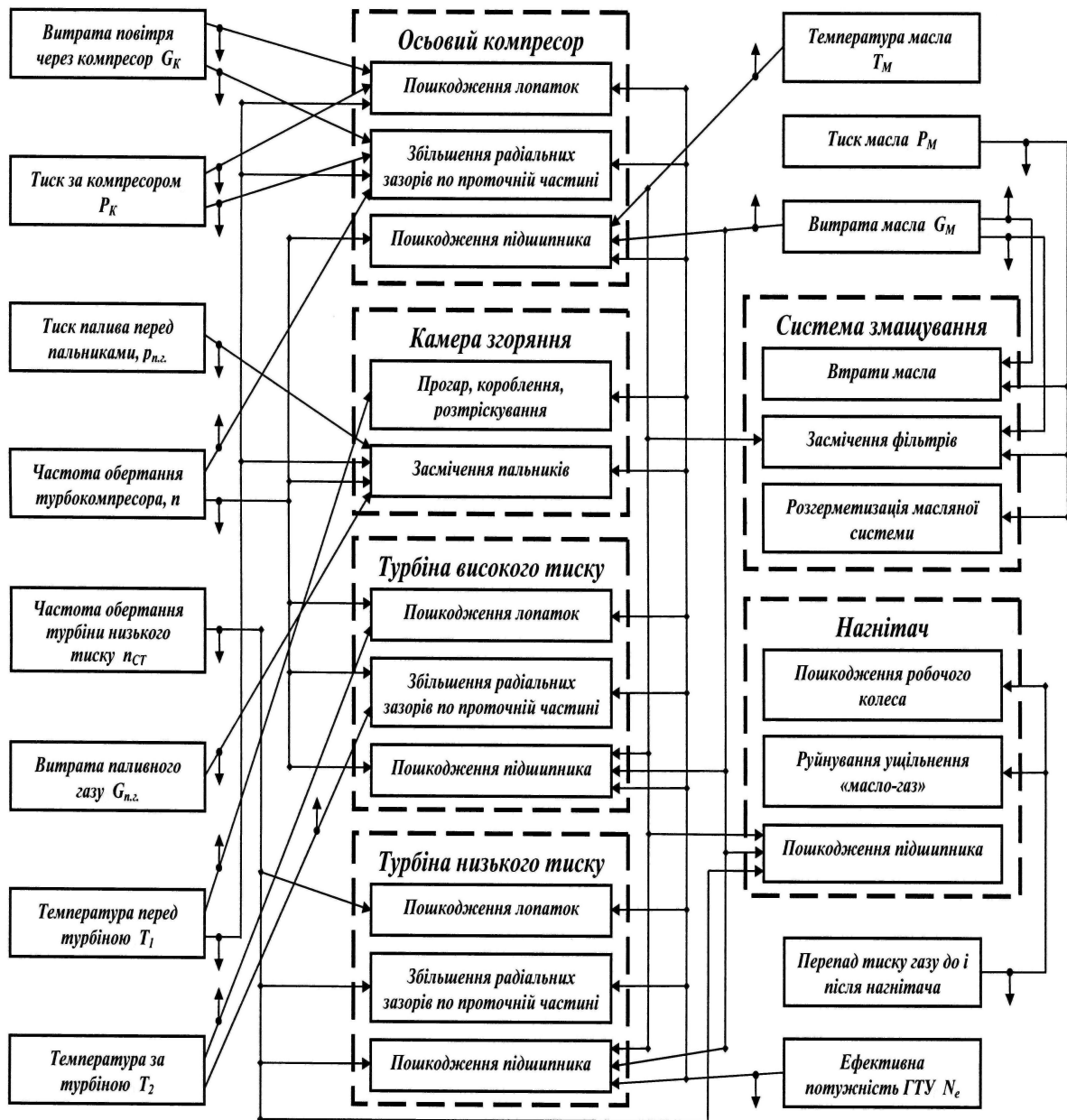
Як діагностичні параметри використовують:

- тиск та температуру газу;
- температуру підшипників;
- тиску масла;
- рівень вібрації.

Результати цих вимірювань відображаються на реєструвальних приладах центрального пульта керування цехом [3; 4]. Якщо відомі норми значень параметрів, швидкості їх зміни, визначенні взаємозалежності між параметрами і можливими дефектами, то можна виявляти місця появи несправностей, призначати операції з проведення технічного обслуговування або дострокового виведення двигуна з експлуатації.

Останніми роками для діагностування технічного стану ГПА використовують такі критерії, як параметричні комплекси, комплексні параметри або комплексні параметричні критерії, які в аналітичній формі зв'язують між собою кілька параметрів, а отже, краще характеризують робочий процес агрегату.

Несправності, що виникають під час експлуатації, впливають на зміну комплексного параметра більшою мірою, ніж на кожен окремий параметр.



Логічна модель зв'язків функціональних параметрів з характерними несправностями ГПА

Для оцінювання стану ГПА за комплексним параметром використовують відносну величину [6], яка відображає ступінь відхилення значення комплексного параметра від еталонного значення:

$$K = B - B_0,$$

де B – значення дійсного комплексного параметра, зведеного до стандартних атмосферних умов;

B_0 – еталонне значення комплексного параметра.

Використання відносної величини K ефективно для оцінювання працездатності ГПА у цілому. Але виявлення місця і причини несправності – складний процес.

Для успішного виявлення несправностей потрібно застосовувати одночасно кілька комплексних та індивідуальних параметрів, які б якнайповніше відображали суть робочих процесів ГПА і характеризували працездатність окремих вузлів ГПА. Такий метод оцінювання технічного стану ГПА називають функціонально-параметричним.

Для використання іонного методу контролю зносу та руйнації газоповітряного тракту розроблено електростатичні зонди-стрижні з нержавіючої сталі, які встановлюють у вихлопному пристрої ГТУ.

Під час роботи ГТУ іони або електрони робочого тіла зіштовхуються з зондом, віддаючи йому частину своєї енергії. Підсилений слабкий сигнал із зонду подається на осцилограф. Якщо двигун справний, то величина електричного сигналу невелика.

Металеві частинки, які з'являються у процесі руйнування деталей, взаємодіють з іонами, електронами робочого тіла і зіткнувшись із зондом передають йому значно більшу кількість енергії. За допомогою таких електростатичних зондів можна виявляти несправність проточної частини ГТУ на початковій стадії розвитку.

Комп'ютерне моделювання динаміки і зношування вузлів ефективно доповнює методи оцінки технічного стану ГПА, дозволяє пов'язати в одне ціле зміну функціональних і динамічних параметрів ГПА та зношування окремих його елементів і прогнозувати ці процеси на час майбутньої експлуатації.

Останнім часом спостерігається інтенсивний розвиток експертних систем за рахунок створення надійних і швидких алгоритмів пошуку несправностей. Як їхню методологічну основу використовує логічний аналіз причинно-наслідкових зв'язків.

ВАТ «Газпром» разом з іншими російськими організаціями розробило і впровадило цілий ряд таких експертних автоматизованих і напівавтоматизованих систем вібро-, параметричної діагностики та захисту («СВИД», «КАСКАД-АНТЕС», «ДСА-2001») [3; 7], призначених для контролю технічного стану ГПА різних типів.

Експертна система на комп'ютері у режимі «on-line» повідомляє про всі відхилення параметрів, здійснює пошук несправностей і видає рекомендації щодо подальшої експлуатації устаткування.

Створені автоматичні системи штучного інтелекту мають вигляд нейрокомп'ютерів, нейромереж.

Метод визначення технічного стану відцентрових нагнітачів природного газу з використанням нейромережевого підходу запропоновано в роботі [7]. Алгоритм цього методу можна застосувати і для ГТУ.

За допомогою нейромереж апроксимуються зведені характеристики газотурбінної установки.

Оскільки стан ГТУ характеризується відносним відхиленням технологічних параметрів від своїх базових значень, то чим більшого значення набувають ці величини, тим гірший технічний стан ГТУ.

На зупиненому ГПА для оцінювання його технічного стану використовують візуальні методи з застосуванням оптичних приладів, методи і прилади радіографічного контролю, методи «свідка», де критерієм стану ГПА є відсутність або наявність виявлених пошкоджень на спеціально вбудованих діагностичних елементах.

Як оптичні прилади використовують ендоскопи різних конструкцій. Об'єктами застосування ендоскопів є відповідальні вузли:

- лопатковий апарат компресора і турбіни (стан поверхні, зазори в проточній частині);
- елементи камери згоряння (стан фронтального пристрою, жарової труби);
- лопатковий апарат колеса і дифузора нагнітача;
- диски;
- зварні шви корпусів.

За допомогою ендоскопів можна отримати як загальну, так і оперативну інформацію про стан наведених вузлів. Ендоскопи умовно можна поділити на три групи:

- прямі ендоскопи з лінзовою оптикою.
- ендоскопи з рухомими частинами, з'єднаними між собою універсальними оптичними шарнірами;
- волоконно-оптичні ендоскопи з гнучкою робочою частиною.

Прямі ендоскопи з лінзовою оптикою різняться за діаметром, довжиною робочої частини, кут зору (торцевий зір або боковий), типом окуляра (прямий окуляр, кутовий окуляр), оптичною характеристикою та механізацією.

Ендоскопи з рухомими частинками можна застосовувати для огляду криволінійних каналів.

- Перевагою використання оптичних приладів є:
- простота контролю;
 - нескладне устаткування;
 - невелика трудомісткість;
 - забезпечення дефектоскопії всередині закритого простору на великій глибині;
 - використання холодних джерел світла високої яскравості, що дозволяє проводити дефектоскопію в порожнинах, які містять вибухові речовини;
 - вбудована відеокамера дає змогу відображати інформацію на екран монітора [2].

Радіографічний метод контролю (метод поверхневої активації), розроблений в МДТУ ім. Н.Е. Баумана, ґрунтується на вимірюванні інтенсивності випромінювання радіонуклідної мітки, встановленої на контрольованій ділянці поверхні об'єкта [3; 6].

У результаті винесення радіоактивної речовини маслом її випромінювання зменшується. За градуированими кривими цю зміну переводять у величину зношування.

Для використання радіографічного методу застосовується для визначення зношування підшипників двигунів, розроблено сканувальні гама-дефектоскопи.

Діагностуючи двигун методом «свідка», стрижень або пластину установлюють у газоповітряний тракт. Метод застосовують для контролю абразивного зношення деталей газоповітряного тракту.

На зупиненій ГТУ вимірюють зношування «свідка», що дає змогу оцінити стан газоповітряного тракту установки. Якщо ж «свідок» має багат шаровий елемент, то про досягнення граничного стану газоповітряним трактом судять за появою чергового кольорового шару багат шарового елемента «свідка».

Після розкриття агрегату необхідно:

- провести огляд лопаткового апарата компресора і турбіни, дисків турбіни, елементів камери згоряння, підшипників, ущільнень, коліс нагнітача, ущільнення «масло-газ», шийок роторів;
- заміряти зазори в проточній частині компресора і турбіни, в підшипниках;
- заміряти торцеве биття диска турбіни високого тиску;
- визначити стан центрування роторів турбіни низького тиску – нагнітач;
- визначити твердість лопаток і дисків турбіни;
- перевірити ступінь незрівноваженості роторів;
- перевірити працездатність системи охолодження турбіни;
- перевірити натяги повітроводів і маслопроводів;
- установити рівномірність прилягання лап корпусів до опор.

Незрівноваженість роторів перевіряють за допомогою низькооборотних верстатів маятникового резонансного типу і верстатів зарезонансного типу.

Під час визначення величини і місця розташування дисбалансу верстатом резонансного типу індикатором по черзі вимірюють амплітуду коливання кожного з підшипників. Для цього електроприводом ротор розганяють до 200–250 об/хв, далі за допомогою розчипного пристрою сполучна муфта виводиться із зачеплення. Вимірювання виконують на вибігу в разі досягнення резонансних обертів.

Завдяки використанню резонансного принципу верстата цього типу мають високу чутливість, що дозволяє виявляти і досягати мінімальної залишкової незрівноваженості. Недоліком верстатів цього типу є тривалість процесу зрівноважування.

На верстатах зарезонансного типу ступінь зрівноваженості перевіряють за постійної частоти обертання, що значно перевищує резонанс. Можливість одночасного вимірювання амплітуди і фази коливань обох підшипників значно прискорює перевірку незрівноваженості роторів [2].

У процесі тривалої експлуатації постійно погіршуються механічні властивості металів теплонавантажених деталей. Найприйнятніший метод визначення механічних властивостей металів є контроль твердості. Залежність між основними характеристиками механічних властивостей металів і твердістю дозволяє оцінювати властивості матеріалів, що довго працюють.

Для випробувань на твердість використовують три способи:

- спосіб Брінелля;
- спосіб Роквелла;
- спосіб Віккерса.

Вдавлювання в метал виконували за одним зі способів за допомогою твердомірів статичних і динамічних дії. У твердомірах статичної дії вдавлювання в метал проводиться поступово ручним механізмом. Недоліком твердомірів статичної дії є необхідність їх кріплення до випробовуваної деталі.

У твердомірах динамічної дії вдавлювання проводиться ударним навантаженням. Твердоміри мають значно менші габаритні розміри і масу, не потребують закріплення, дозволяють виконувати вимірювання на деталях будь-яких

форм і розмірів. Твердоміри динамічної дії можна використовувати для контролю міцнісних властивостей елементів турбіни і камери згоряння, зварних з'єднань.

Для оцінювання технічного стану ГПА у розкритому положенні застосовують також візуально-оптичний, капілярний, струмовихровий та ультразвуковий методи.

Висновки

Аналіз описаних методів та критеріїв оцінювання технічного стану ГПА показує, що застосування одного окремо взятого методу не дає повної картини технічного стану.

Кожен із методів дозволяє виявляти дефекти, несправності лише одного чи кількох вузлів, агрегатів, елементів або однорідні за походженням і природою дефекти, пошкодження. Наприклад, за критерієм накопичення продуктів зносу в маслі можна виявити несправності підшипників та інших пар тертя, але дефекти лопаток компресора або турбіни виявити неможливо.

Візуально-оптичним методом контролю можна виявити однорідні дефекти, несправності газоповітряного тракту ГТУ, такі, як тріщини.

Для виявлення неоднорідних дефектів, руйнувань, пошкоджень як кожного агрегату, вузла окремо, так і ГПА в цілому потрібно застосовувати декілька методів одночасно. Якщо ж оцінювати ефективність кожного методу окремо, то найефективнішим з них є метод з використанням комплексних параметричних критеріїв та метод оцінювання технічного стану за рівнем вібрації.

Література

1. *Лозицкий Л.П.* Оценка технического состояния авиационных ГТД / Л.П. Лозицкий, А.К. Янко, В.Ф. Лапшов. – М.: Транспорт, 1982. – 160 с.

2. *Терентьев А.Н.* Надежность газоперекачивающих агрегатов с газотурбинным приводом / А.Н. Терентьев, З.С. Седых, В.Г. Дубинский. – М.: Недра, 1979. – 207 с.

3. *Гриб В.В.* Анализ современных методов диагностирования компрессорного оборудования нефтегазохимических производств / В.В. Гриб, А.Г. Соколова, А.П. Еранов // Нефтепереработка и нефтехимия. Научно-технические достижения и передовой опыт. – 2002. – №10. – С. 57–65.

4. *Максименко С.В.* Методы и средства технической диагностики оборудования компрессорной станции / С.В. Максименко, Г.Н. Поляков, А.Н. Труфанов // Обз. инф. Сер. Транспорт и подземное хранение газа. – М.: ВНИИЭ Газпром, 1990. – 66 с.

5. *Зарицкий С.П.* Диагностическое обслуживание оборудования КС / С.П. Зарицкий // Обз. инф. Сер. Газовая промышленность на рубеже XXI века. – М.: ИРЦ Газпром. 2000. – 156 с.

6. *Соковиков В.В.* Мониторинг малых скоростей изнашивания и коррозии методом радиондикаторов / В.В. Соковиков, И.О. Константинов. – Обнинск: ГНЦ РФ ФЭИ, 2000. – 28 с.

7. *Горбійчук М.І.* Ідентифікація технічного стану нагнітачів природного газу / М.І. Горбійчук, О.А. Скріпка. – Івано-Франківськ, ІФНТУНІГ, 2004. – 112 с.

8. *Кеба И.В.* Диагностика авиационных газотурбинных двигателей / И.В. Кеба. – М.: Транспорт, 1980. – 248 с.

9. *Келер К.О.* Диагностика автомобильного двигателя / К.О. Келер. – Ужгород: Карпаты, 1977. – 160 с.

10. *Семенов А.С.* Комплексный анализ работоспособности газоперекачивающих агрегатов на основе прогноза остаточного ресурса / А.С. Семенов // Автореф. дис. на соиск... учен. степ. канд. техн. наук. – Тюмень, 2004.