

На правах рукопису

ІЗБАШ Віктор Іванович

РОЗРОБКА МЕТОДІВ ПАРАМЕТРИЧНОГО ДІАГНОСТУВАННЯ
ГАЗОПЕРЕКАЧУЮЧИХ АГРЕГАТІВ В УМОВАХ КОМПРЕСОРНИХ СТАНЦІЙ
(на прикладі агрегатів ГТК-101 та ГТК-251)

05.15.13 - Будівництво та експлуатація нафтогазопроводів,
баз і сховищ

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т

дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Івано-Франківськ, 1994

ПВ 30.494

Дисертація є рукопис

Робота виконана в Івано-Франківському інституті нафти і газу

Науковий керівник:
кандидат технічних наук, доцент Грудз В.Я.

Офіційні опоненти:

1. Доктор технічних наук Капцов Іван Іванович.
2. Кандидат технічних наук, доцент Мартинук Тарас Августинович.

Провідна організація:
Акціонерне товариство Укргазпром (м. Київ)

Захист відбудеться 07 липня 1994 року о 12 годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 09.02.01 в Івано-Франківському державному технічному університеті нафти і газу.
Адреса: 284018, м. Івано-Франківськ, вул. Карпатська, 15.

З дисертацією можна ознайомитися в бібліотеці Івано-Франківського державного технічного університету нафти і газу за адресою: м. Івано-Франківськ, вул. Карпатська, 15.

Автореферат розіслано " 06 " червня 1994 року.

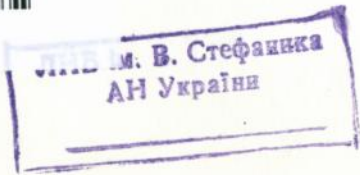
Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради

Л.С.Шлапак

ЛННБ України ім.В.Стефаніка



00756560 (Т)



ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність проблеми. Одним з важливих ланок системи газозабезпечення України є компресорні станції магістральних газопроводів. Забезпечення ефективного і надійного функціонування газоперекачувчого обладнання компресорних станцій (КС) має суттєве значення в сфері ритмічного постачання паливно-енергетичними ресурсами. Сумарна потужність КС системи газозабезпечення України складає 5433,773 МВт, серед них до 79,7 % потужності припадає на долю агрегатів з газотурбінним приводом. Агрегати закордонного виробництва типів ГТК-101 та ГТК-251 складають значну частку парку газоперекачувчих апаратів (ГПА) України (25,1 %).

Надійність експлуатації багато в чому залежить від досконалості системи обслуговування, яка, в свою чергу, залежить як від системи проведення планово-попереджувальних ремонтів і рівня кваліфікації обслуговувачого персоналу, так і від системи контролю робоздатності обладнання, що означається технічним рівнем систем діагностування технічного стану агрегатів, призначених для цього.

Основне завдання експлуатації газоперекачувчого обладнання полягає в попередженні відказів і підтримці технічного стану на заданому рівні шляхом постійного контролю технічного стану обладнання і своєчасного проведення планово-попереджувальних ремонтів.

Найбільш прогресивною формою експлуатації обладнання магістральних газопроводів (МГ) є обслуговування по реальному технічному стану. Перейти до такої форми експлуатації можливо за умов широкого розвитку і застосування на практиці комплексних систем діагностування та прогнозування технічного стану з використанням спеціальних вимірвальних засобів та ЕОМ.

Мета роботи. Дослідження та розробка методів діагностування агрегатів типів ГТК-101 та ГТК-251 для рішення комплексу завдань по ідентифікації несправностей, прогнозуванню стану ГПА на основі аналізу характеру змін непрямих термогазодинамічних параметрів і експлуатаційних характеристик обладнання з використанням математичних моделей діагностування технічного стану ГПА.

Основні задачі. Кожному термодинамічному стану двигуна відповідає конкретна його спроможність вибрати відповідну потужність для даної витрати палива. Для встановлення зв'язку між термогазодинамічним станом двигуна і його механічним станом з метою робо-

дови розгорнутої системи діагностування і прогнозування несправностей необхідно розв'язати ряд задач:

побудувати характеристики елементів ГПА для всього поля зміни робочих параметрів;

дослідити основні несправності газоповітряного тракту ГПА і визначити діагностичні параметри, що їх характеризують;

розробити методи діагностування основних несправностей газоповітряного тракту за допомогою математичних моделей;

розробити методи прогнозування технічного стану ГПА для планування профілактичного обслуговування.

На захист вноситься:

системний підхід до діагностування газоперекачуючих агрегатів типів ГТК-101 та ГТК-251;

математична модель діагностування основних несправностей газоповітряних трактів агрегатів;

математичні моделі розрахунку характеристик основних елементів агрегату та методи їх ідентифікації;

способи приведення робочих параметрів агрегатів при зміні навантаження та зовнішніх умов.

Наукова новизна. Для газоперекачуючих агрегатів типів ГТК-101 та ГТК-251 розроблено комплекс алгоритмів і програмне забезпечення для вирішення основних завдань технічного діагностування; одержано інженерні методи розрахунків, за допомогою яких побудовано характеристики основних елементів даних типів ГПА; методи приведення робочих параметрів при зміні навантаження та зовнішніх умов роботи ГПА; розроблено дворівневу систему діагностування даних типів агрегатів за допомогою діагностичних матриць; запропоновано методику формування діагностичних матриць та ідентифікації несправностей ГПА по зміні характерних діагностичних ознак та методи прогнозування стану ГПА для планування профілактичного обслуговування.

Практична значимість. За допомогою розробленого комплексу алгоритмів і програм математичних моделей елементів ГПА побудовано їхні характеристики та універсальні характеристики ГПА для визначення робочих параметрів циклу агрегату на різних режимах його роботи. Запропоновано методику діагностування ГПА даних типів за допомогою діагностичних матриць та ідентифікації несправностей агрегатів по зміні характерних діагностичних ознак. Сформульовано основні принципи прогнозування технічного стану ГПА для проведення профілактичних обслуговувань.

Методику і рекомендації, вироблені в результаті досліджень, дозволяють розширити можливості оперативно-диспетчерського контролю технічного стану агрегатів, скоротити терміни та трудомісткість профілактичних і ремонтних робіт; запобігти аварійним зупинкам обладнання, підвищити ефективність та надійність його використання.

Дана робота пов'язана з дослідженнями, що проводилися в Івано-Франківському інституті нафти і газу в рамках госпдоговірних тем № 5/84-4 та № 5/85-4 і є їхнім продовженням. Розроблені рекомендації використовувались для рішення завдань оперативно-диспетчерського керування на КС МГ "Совз" та "Уренгой-Ужгород". Основні положення та висновки роботи підтверджуються адекватність побудованих математичних моделей та результатів їх числової реалізації фактичним параметрам режиму роботи КС Гусятинська і КС Барська газопроводів "Совз" та "Уренгой-Ужгород".

Апробація роботи. Основний зміст роботи доповідався на всесоюзній науково-технічній конференції "Проблеми науково-технічного прогресу в грубопровідному транспорті газу Західного Сибіру"; II-тій конференції професорсько-викладацького складу Івано-Франківського інституту нафти і газу; науковому семінарі управління магістральних газопроводів "Черкаситрансгаз" АО "Укргазпром"; науковому семінарі кафедри транспорту і зберігання нафти і газу ІФІНГу.

Публікації. Основні результати дисертаційної роботи висвітлено в 6 друкованих працях.

Структура та обсяг роботи. Дисертація складеться з чотирьох розділів, включає програми розрахунків, складені за розробленими алгоритмами, викладена на сторінках машинописного тексту та містить 55 рисунків, 48 таблиць. Список літератури складеться з 198 найменувань.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі зроблено огляд літератури з питань, які вивчаються в дисертації, намічені основні напрямки дослідження. Загальнотеоретичні та різні аспекти прикладних питань технічного діагностування розглядаються в працях Биргера І.А., Верзакова Г.Ф., Гаскарова Д.В., Глезера Б.І., Дубинського В.Г., Кел І.В., Коллакота Р.А., Кучеренка О.С., Матвієва А.В., Мозгалівського А., Ольховського Г.Г., Пархоменка П.П., Поршакова Б.П., Розенберга Г.Ш., Сиротіна М.М. Спо-

ригіної Н.М., Таршина М.С., Тврїна Ю.А., Щуровського В.М., Яковлева Е.І. та інших авторів.

В першому розділі дисертації вирішуються питання особливостей об'єкта ГПА і підхід до завдань діагностування. На даний час на КС магістральних газопроводів, які експлуатують імпорні ГПА типів ГТК-10І та ГТК-25І, на низькому рівні використовується діагностування технічного стану газоповітряного тракту агрегатів, широке впровадження якого могло б дати важливі результати у визначенні експлуатаційної ефективності використання ГПА, у виявленні та попередженні важких механічних пошкоджень обладнання, а також для попереднього прогнозування виникнення несправностей, а це, в свою чергу, обумовить економів паливного газу та зменшення витрат на ремонт агрегатів.

Заводи-виробники ГПА наділили експлуатаційний персонал недостатньою інформацією відносно робочих характеристик елементів ГПА. В разі погіршення технічного стану агрегату в процесі експлуатації ця інформація не дає змоги експлуатаційному персоналу визначити причину погіршення стану ГПА. Іншими словами, експлуатаційному персоналу КС і в центральному відділі експлуатації необхідно мати розгорнуту систему діагностування і прогнозування технічного стану обладнання в послі змінних параметрів його роботи, достовірну в інтервалі основних режимів роботи ГПА, яка б могла ідентифікувати специфічні несправності двигунів і визначати їх експлуатаційну ефективність, на основі якої можна було б розробити стратегії обслуговування ГПА.

В загальному вигляді структуру діагностування технічного стану ГПА можна уявити наступним чином:

- розробка класифікації технічних станів обладнання;
- обґрунтування вибраних критеріїв технічного стану та їх оцінка;
- вибір способу математичного опису ГПА, як об'єкта діагностування;
- обґрунтування методу діагностування або способу виявлення несправностей.

Розробці класифікації технічних станів обладнання присвячені наукові праці Заріцького С.П., Грудза В.Я. Незалежно від стадії життєвого циклу ГПА множини його станів можна розділити на підмножини, які характеризують справний, роботоздатний та несправний стан ГПА.

Розпізнавання технічних станів в процесі діагностування, прогно-

зування їх зміни в межах підмножин і часу переходу з однієї підмножини до іншої можливе, якщо відома функція $\Phi(X)$, в за льяному випадку векторна, компоненти-аргументи X якої складають сукупність визначачих параметрів ГПА, його вузлів, елементів та систем.

Технічний стан ГПА визначається якісно різнорідними характеристиками, що обумовлено різнов фізичнов природов процесів, які протікають в елементах при функціонуванні агрегату; функція $\Phi(X)$ не є одноріднов і може бути представлено в вигляді набору взаємопов"язаних між собов компонент в Φ^j , що відображають різнобічні характеристики станів агрегату. При цьому компоненти Φ^j можуть також бути представлені у вигляді самостійних складових, які виражають видові розбіжності між механічними станами агрегату. Компоненти Φ^j функції $\Phi(X)$, а також її складові, які визначають класи станів, виражаються різними сукупностями аргументів із загального набору, який характеризує X . Функція стану $\Phi(X)$, яка описує простір станів, повинна бути неперервною і диференційованою, допускаючи розклад компонентів в ряд Тейлора по всій сукупності аргументів.

Вибір функції $\Phi(X)$, а також її компонентів і складових, визначається особливостями ГПА, як функціонувчої одиниці, кінцевов множинов станів агрегату, які підлягають розпізнаванню, та рівнем контролепридатності ГПА. В зв"язку з тим, що стан ГПА змінюється в часі, функція стану залежить від часу, тобто є складнов. Якщо діагностична модель включає опис початковов стану ГПА $\Phi^j(X_0)$, то вона буде розповсюджуватися тільки на конкретний ГПА. Такі моделі в подальшому будуть називатися індивідуальними. Моделі, які передбачають єдиний опис початковов стану ГПА в межах аргументів одного типу, будуть називатися узагальненими. Згідно з визначенням індивідуальні моделі потребують проведення спеціальних дослідів кожного ГПА по зняттю його базових характеристик, що визначають початковий стан агрегату. Узагальнені моделі базуються на використанні середньостатистичних базових характеристик, які визначають за даними досліджень обмеженої кількості однотипних ГПА.

Вид моделі можна уніфікувати в обсязі однотипних ГПА, якщо функції технічного стану виразити через приріст її аргументів відносно їх початкових значень. Під початковими значеннями при цьому мають на увазі значення, які відповідають початковому стану кожного конкретного ГПА. Практично вони повинні бути визначені при випробуваннях ГПА в експлуатаційних умовах під час зняття і базово-

вих характеристик. Такий підхід буде доцільним також у зв'язку з тим, що при цьому виключається вплив на відхилення діагностичних ознак систематичної складової похибки вимірів і тим самим підвищується якість діагностування. Універсальні моделі можуть бути також як індивідуальними, так і узагальненими, але очевидно, що перевагу будуть мати індивідуальні моделі, оскільки в процесі зняття базових характеристик немає потреби прогнати спеціальні випробування ГПА, а базові характеристики можна одержати за даними початкового періоду експлуатації. В роботі віддано перевагу розробці уніфікованих індивідуальних моделей для діагностування технічного стану ГПА.

Надзвичайно важливо вибрати таку сукупність контрольованих параметрів роботи ГПА, яка найбільш суттєво реагує на можливі зміни фізичних і хімічних процесів при переході ГПА від одного стану до іншого в межах підпростору станів. При цьому вибрана сукупність повинна забезпечити максимальну різницю між відхиленням сформованих на її основі діагностичних ознак, які відповідають переходу від справного стану до несправного.

Основну увагу в дисертації приділено розробці питань пошуку функції стану агрегатів, вибору необхідної сукупності контрольованих параметрів та діагностичних ознак, побудові діагностичних моделей для ГПА типів ГТК-10І та ГТК-25І.

В роботі зроблено аналіз основних несправностей ГПА та параметрів, що відображають їхню появу та розвиток. Раптовий відказ пов'язаний з миттєвою зміною умов експлуатації, що призводить до пошкодження ГПА. Випадковість тут пов'язана з суб'єктивним характером очікування диспетчерського персоналу, а не з характером фізико-математичних процесів, які проходять в технічній системі. Поява відказів, як правило, пов'язана з проявом первинної несправності конструктивного або експлуатаційного характеру та постійним накопиченням пошкоджень, що погіршують роботоздатність агрегату, або поступовим накопиченням змін, які спричиняють в якийсь момент релаксації, що сприймається технічним персоналом як раптовий відказ.

Об'єктивними причинами появи несправностей можуть бути:

- конструкторські, які викликані невдалими конструкторськими рішеннями;
- технологічні, які обумовлені рівнем конкретного виробництва та технологічність конструкції;
- пов'язані з якістю і стабільністю властивостей застосованих

матеріалів;

експлуатаційні, пов'язані з кондиційністю робочого середовища ГПА: циклового повітря, паливного газу, технологічного газу, масла;

які характеризують якість і своєчасність проведення ремонтних робіт.

Поруч з об'єктивними причинами мають місце і причини суб'єктивного характеру, обумовлені порушенням умов експлуатації ГПА.

Всі несправності, які виникають в ГПА на протязі його циклу експлуатації, можна розділити на несправності, які впливають на надійність ГПА, та несправності, які впливають на ефективність його функціонування. Далі в роботі зроблено аналіз характерних несправностей, які впливають на надійність кожного з основних елементів ГПА, та причин їх виникнення, а також несправностей, які впливають на ефективність функціонування агрегату та критеріїв, що характеризують ці несправності.

В зв'язку з обмеженими можливостями вимірвальних засобів, складність установки первинних перетворювачів, недостатнім обладнанням ГПА даних типів вимірвальними засобами в дисертації основна увага приділяється розробці методів визначення стану агрегату за допомогою побічних ознак, за які прийнято термогазодинамічні параметри, що є кількісними характеристиками робочих процесів, які протікають в елементах агрегату в період його функціонування.

В роботі зроблено короткий порівняльний аналіз методів визначення діагностичних параметрів. Для енергетичних ГПА, якими є ГТК-101 та ГТК-251, найбільш придатними методами для визначення діагностичних параметрів є методи математичного моделювання. В зв'язку з цим в роботі розглядаються різні підходи до розробки математичних моделей ГПА, які за трудомісткістю відрізняються в десятки разів. Для математичного опису робочих процесів в елементах ГПА в даній роботі використовуються моделі третього рівня складності, в яких застосовуються складні взаємозв'язки геометричних параметрів елементів агрегатів з параметрами термогазодинамічного циклу. При цьому розрахунок течії газу в профільованих частинах агрегату проводиться на середньому радіусі, тобто не враховується кривина лінії току.

Для діагностичних моделей агрегату в даній роботі застосовано моделі другого рівня складності, де відповідні рівняння лінеаризуються у відповідності з методом малих відхилень, розроблені в

працях Черкеза А.Я. В дисертації розроблено структурну схему параметричної моделі ГПА.

Другий розділ присвячено розробці математичних моделей елементів ГПА і побудові їх характеристик та універсальних характеристик агрегату. На попередньому етапі побудови математичних моделей було визначено всі геометричні розміри елементів ГПА і побудовано скелетну схему агрегату, оцінено всі фактори, які впливають на витратні та енергетичні характеристики елементів ГПА: гідравлічні втрати, зміну витрат повітря на охолодження елементів турбін та перетікання в ущільненнях при зміні режиму, оцінку ККД камери згоряння та витрати потужності на привід догоміжних механізмів.

Робота системи антиайсінгу вносить суттєві зміни в роботу ГПА. При роботі системи змінюється витратні характеристики потоків в елементах газотурбінної установки (ГТУ), тиски та температури робочого тіла, тому при побудові математичних моделей розрахунку характеристик ГПА необхідно враховувати ці зміни. Системи антиайсінгу даних типів ГПА суттєво відрізняються між собою. В роботі проведено розрахунки характеристик систем та визначено їхній вплив на зміну робочих параметрів і витратних характеристик основних елементів даних типів ГПА.

Важливим параметром, який впливає на подальші характеристики циклу агрегату, є склад паливного газу. В роботі приведено методику розрахунку теоретичної кількості повітря, необхідної для спалювання 1 кг газу, густини, теплосмості та нижньої теплоти згоряння від його складу, а також методи розрахунку коефіцієнта надлишку повітря, масових витрат та теплосмості робочого тіла турбін в залежності від складу вихлопних газів.

Найдосконаліші методи розрахунку реальної течії повітря в осьовому компресорі не зможуть врахувати в'язкісних ефектів, нестійкості потоку до будь-яких збурень, тому всі методи моделювання характеристик компресорів будуть мати певну умовність математичної моделі. Методи моделювання ґрунтуються на результатах теорії подібностей. Стосовно течії повітря в компресорах, ці результати полягають в рівності критеріїв Маха і Струхая або їх похідних

$$G_{\text{пр}} = \frac{6\sqrt{T_{4k}^*}}{P_{4k}}; \quad n_{\text{пр}} = \frac{n_k}{\sqrt{T_{4k}^*}},$$

де $G_{\text{пр}}$ - приведені витрати потоку повітря на вході в осьовий компресор (ОК); $n_{\text{пр}}$ - приведена частота обертання ротора ОК; G , T_{4k}^* , P_{4k} -

витрати, температура і тиск потоку повітря на вході в ОК; Π_k - частота обертання ротора ОК.

Для побудови математичної моделі осьового компресора використана методика побудови його характеристик, яка ґрунтується на положеннях гідродинамічної теорії та дослідженнях аеродинамічних характеристик плоских решіток, яким присвячені праці Бекнеса В.С., Буйновського Л.Н., Гофліна А.П., Довжика С.А., Маслова Л.А., Митрофанова А.А., Мофетта Д., Нечасва Ю.Н., Селезньова К.П., Сироткіна Я.А., Солохіної В.В., Степанова Г.В., Терещенка В.М., Тихонова Н.Д., Хауторна У.Р., Холщевникова К.В., Хорлокка Д.К., Янсені А. та інших. Алгоритм розрахунку характеристик осьового компресора у вигляді

$$\Pi_k^* = f_1(G_{\text{пр}}, n_{\text{пр}}); \quad \zeta_{k,\text{ад}}^* = f_2(G_{\text{пр}}, n_{\text{пр}}),$$

де Π_k^* - степінь стиснення ОК по певним параметрам; $\zeta_{k,\text{ад}}^*$ - адіабатичний ККД ОК,

базується на узагальнених характеристиках ступеней, одержаних при розрахунковому розподілі параметрів потоку по радіусу на вході в ступінь. При узагальненні експериментальних даних середня по радіусу характеристика ступені приписується елементарній ступені на середньому радіусі.

Поступеневий розрахунок характеристик ступені при даній круглій швидкості складається з двох етапів:

1) розрахунок оптимальних параметрів ступені за конструктивними параметрами решіток на середньому радіусі лопаточних вінців та розмірами проточної частини;

2) розрахунок параметрів ступені при поточному значенні витратного коефіцієнта за одержаними оптимальними параметрами і узагальненими характеристиками ступеней.

Попередні дані для розрахунку характеристик ОК формувься в такій послідовності:

конструктивні параметри лопаток;

параметри повітряного потоку на вході в компресор;

режимні параметри роботи компресора;

поправочні коефіцієнти.

Алгоритм розрахунку характеристик ОК реалізований у вигляді програми для ЕОМ на мові Фортран. По результатах розрахунку побудовано універсальні характеристики для ОК ГТК-101 та ГТК-251 у вигляді

$$P_k^* = f_1(G_{\text{пр}}, n_{\text{пр}}); \quad \zeta_k^* = f_2(G_{\text{пр}}, n_{\text{пр}}),$$

а також графіки залежностей

$$N_{\text{ек}} = f_3(G_{\text{пр}}, n_{\text{пр}}); \quad \zeta_k^* = f_2(G_{\text{пр}}, n_{\text{пр}}),$$

та

$$\frac{\zeta_{k1}^*}{\zeta_k^* \text{ при } t_{00}^* = 15^\circ\text{C}} = f_4(t_{00}^*; N_{\text{ек}}),$$

де $N_{\text{ек}}$ - потужність ОК; t_{00}^* - температура атмосферного повітря.

Камери згоряння агрегатів ГТК-101 та ГТК-251 за характером розподілу потоків відносяться до камер зі зворотнім поворотом потоку, за конструктивним виготовленням - до секційних камер, за конструкцій паливного устаткування - до дифузійних.

Для пошуку математичної моделі камери згоряння використані праці Кузнецова Л.А., Пчелкіна Л.М., Шатіля А.А.

На першому етапі зроблено попередні розрахунки витрат повітря на охолодження соплового апарату турбін високого тиску, елементів ротора, уцілювання підшипникових вузлів і визначені витрати повітря, яке бере участь в процесі горіння та змішування. Зроблено попередні розрахунки коефіцієнта корисної дії, коефіцієнта втрат повного тиску в камері згоряння.

На досліджуваних двигунах вимір витрат паливного газу постійно не проводиться, тому для аналізу всього спектру робочих режимів ГПА в роботі було побудовано алгоритм і зроблено розрахунки витратних характеристик паливників в залежності від тиску повітря за ОК і тиску паливного газу.

Розроблено алгоритм розрахунку характеристик камери згоряння, за допомогою якого зроблено розрахунки для досліджуваних двигунів на основних режимах їх роботи.

Побудову математичної моделі середньострумєневого розрахунку характеристик турбіни в роботі розпочато з аналізу характеру течії робочого тіла в елементах турбіни. Встановлено, що в усьому робочому діапазоні параметрів на вході в турбіну швидкість на виході із соплового апарату турбіни високого тиску буде надзвуковою, тобто ця обставина повинна бути врахована при складанні математичної моде-

лі турбіни.

В роботі зроблено аналіз втрат енергії в елементах турбіни та вибір швидкісних коефіцієнтів для соплових апаратів і робочих лопаток. Оскільки в турбінах низького тиску даних двигунів застосовуються поворотні соплові апарати, за допомогою яких реалізується закон регулювання сталості частоти обертання турбіни високого тиску $\Pi_{\text{ТВД}} = \text{const}$, то попередньо була встановлена залежність вхідного і вихідного кутів профілів соплового апарату турбіни низького тиску від показників приладу кута повороту привідного кільця лопаток.

Для побудови математичної моделі середньоструменевого розрахунку характеристик турбіни в дисертації використовуються відомі газодинамічні залежності, результати продувок плоских решіток турбін, методи обчислення втрат в ступенях, відомі з праць Аронова Б.І., Бойка А.В., Гречаниченка В.В., Гусакова Б.А., Дейча М.В., Жиріцького Г.С., Іноземцева Н.В., Котляра І.В., Курзона А.Г., Мамасва Б.Н., Маслова Л.А., Нечасва В.Н., Рао С.С., Сиротіна Я.А., Соколовського Г.А., Степанова Г.Ю., Стоянова Ф.А., Гроляновського Б.М., Лаурона У.Р., Шнея Я.І., Шубенка-Шубіна Л.А. та інших.

Алгоритм розрахунку характеристик турбіни реалізований у вигляді програми для ЕОМ на мові Фортран. За результатами розрахунку характеристик турбіни побудовано графічні залежності узагальнених характеристик турбін високого і низького тиску для ГПА типів ГТК-101 та ГТК-251 у вигляді:

$$\frac{P_{\text{до ТУРБ}}^*}{P_{\text{за ТУРБ}}^*} = f_1 \left(\frac{G_{\text{ТУРБ}} \cdot \Pi_{\text{ТУРБ}}}{P_{\text{за ТУРБ}}^*}; \frac{\Pi_{\text{ТУРБ}}}{\sqrt{T_{\text{до ТУРБ}}^*}} \right);$$

$$\frac{P_{\text{до ТУРБ}}^*}{P_{\text{за ТУРБ}}^*} = f_2 \left(\frac{G_{\text{ТУРБ}} \cdot \Pi_{\text{ТУРБ}}}{P_{\text{до ТУРБ}}^*}; \frac{\Pi_{\text{ТУРБ}}}{\sqrt{T_{\text{до ТУРБ}}^*}} \right);$$

$$\frac{L e_{\text{ТУРБ}}}{\Pi_{\text{ТУРБ}}^2} = f_3 \left(\frac{G_{\text{ТУРБ}} \cdot \Pi_{\text{ТУРБ}}}{P_{\text{до ТУРБ}}^*}; \frac{P_{\text{до ТУРБ}}^*}{P_{\text{за ТУРБ}}^*} \right);$$

$$\zeta_{\text{ТУРБ}}^* = f_4 \left(\frac{G_{\text{ТУРБ}} \cdot \Pi_{\text{ТУРБ}}}{P_{\text{до ТУРБ}}^*}; \frac{P_{\text{до ТУРБ}}^*}{P_{\text{за ТУРБ}}^*} \right);$$

де $G_{\text{ТУРБ}}$ - витрати робочого тіла в турбіні; $P_{\text{до ТУРБ}}^*$, $P_{\text{за ТУРБ}}^*$ - повний і ста-

тичний тиски робочого тіла; $n_{\text{турб}}$ - частота обертання ротора турбіни; $\eta_{\text{ефект}}$ - ефективна робота розширення робочого тіла в турбіні; $\zeta_{\text{турб}}^*$ - ККД турбіни.

В роботі розроблено схему ідентифікації результатів розрахунку характеристик за математичними моделями з реальними характеристиками елементів агрегату.

При побудові математичної моделі розрахунку характеристик нагнітача в роботі було використано методикку розрахунку по приведених характеристиках, побудованих при газодинамічних випробуваннях нагнітача з застосуванням теорії подібностей та розмірностей. При цьому використовувались методи апроксимації характеристик нагнітача, викладені в працях Бобровського С.А., Немудрова А.Г., Яковлева Е.І. Основним завданням розрахунку математичної моделі характеристик нагнітача є знаходження потужності, яку споживає нагнітач при заданих параметрах газу і частоти обертання ротора, для проведення балансування розрахунків турбіни низького тиску і нагнітача за потужність. Алгоритм розрахунку характеристик нагнітача реалізовано у вигляді програми для ЕОМ і за його допомогою зроблено розрахунки основних режимів роботи для досліджуваних типів агрегатів.

Характер зміни параметрів елемента зі змінюваних умов чи режиму роботи ГПА визначається не тільки самим елементом, а й елементом, який працює сумісно з даним (турбіна високого тиску - осьовий компресор; турбіна низького тиску - нагнітач). Для знаходження ліній сумісної роботи елементів агрегату в роботі побудовано ряд універсальних характеристик ГПА в безрозмірних координатах. Ці характеристики використовуються для визначення параметрів ГПА при зміні зовнішніх умов та режиму роботи.

За результатами розрахунку характеристик основних елементів ГПА побудовано графік параметрів сумісної роботи цих елементів у складі газотурбінного двигуна (ГТД), (рис.).

Третій розділ присвячено розробці за допомогою методу малих відхилень способів приведення параметрів ГПА при зміні режиму його роботи чи навколишніх умов, якщо ці зміни достатньо малі, та методиці діагностування досліджуваних типів агрегатів. Ці питання потребують, як правило, оперативного вирішення. В роботі проведено лінеаризацію основних термогазодинамічних рівнянь робочих процесів в елементах ГПА і побудовано алгоритм приведення параметрів при зміні навантаження та зовнішніх умов роботи для агрегатів досліджу-

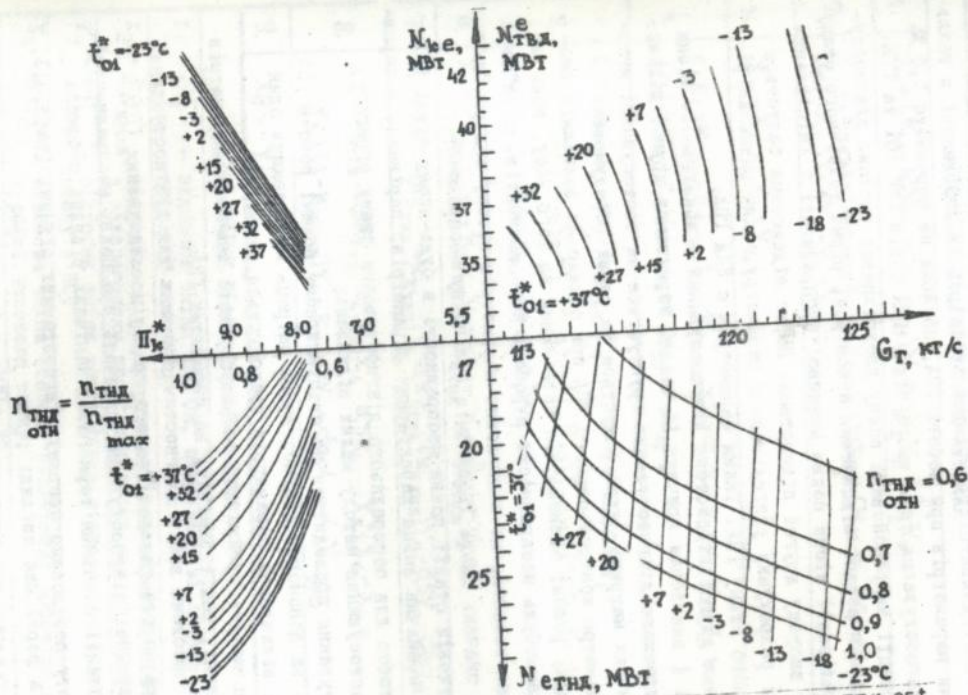


Рис. Графік сумісних характеристик основних елементів ГПА ГТК-251

ваних типів. Приведені алгоритми реалізовано у вигляді програм для ЕСМ на мові Фортран і за ними зроблено відповідні розрахунки зміни параметрів ГПА. Адекватність моделей перевірено в порівнянні з реальними змінами параметрів при роботі ГПА, похибка не перевищує 5,6 %.

Для діагностування технічного стану ГПА типів ГТК-101 та ГТК-251 в дисертації запропоновано схему двофазової системи діагностування. Завданням першої підсистеми є контроль рівня технічного стану ГПА без локалізації місця появи можливої несправності і ініціювання сигналу для запуску другої підсистеми. Перша підсистема базується на алгоритмі розрахунку узагальненого параметру, який визначає рівень технічного стану ГПА. Таким параметром є ККД ГПА.

Завданням другої підсистеми діагностування є локалізація місця несправності і виявлення причини її появи. Формування другої підсистеми параметричного діагностування ґрунтується на застосуванні методу діагностичних матриць, який базується на таких передумовах:

всі параметри контрольованого ГПА при однакових зовнішніх умовах і на одному режимі залишаються незмінними до того часу, поки не з'явиться яка-небудь несправність в роботі його елементів, в зв'язку з чим можна вважати, що відхилення параметрів потоку від раніше вимірних їх значень дають інформацію про появу несправності;

на початковій стадії появи несправності в будь-якому вузлі ГПА відбувається незначна зміна характерних параметрів, порівняно з справним вузлом, тобто для попереднього діагностування стану агрегату правомірне застосування методу малих відхилень;

діагностування проводиться на стаціонарному режимі роботи ГПА;

діагнози за допомогою діагностичних матриць не залежать один від одного, а відхилення параметрів враховується разом;

за базові можуть прийматися як розрахункові значення параметрів на певному режимі, так і вимірні на справному ГПА.

В роботі зроблено вибір діагностичних ознак для діагностування основних несправностей газоповітряного тракту досліджуваних ГПА, зміни яких в процесі діагностування свідчать про появу несправностей. Шляхом лінеаризації основних термогазодинамічних рівнянь робочого процесу агрегату побудовано систему діагностичних рівнянь (табл. I), яка в матричній формі має вигляд:

$$PX = QY,$$

де X - вектор-стовбець шуканих малих відхилень діагностичних ознак; Y - вектор-стовбець малих відхилень вимірних параметрів роботи ГПА; P - квадратна матриця коефіцієнтів при шуканих малих відхи-

Таблиця I

СИСТЕМА ДІАГНОСТИЧНИХ РІВНЯНЬ	
1.	$X_1 = (k_{11} - k_1)Y_2 + (k_1 - k_{11})Y_3 + \frac{1}{k_2}Y_6 - \frac{1}{k_2}Y_7;$
2.	$X_4 + (k_{4ТВЛ} + 1)k_{3ТВЛ}X_4 + (k_{4ТВЛ} + 1)X_5 = (k_{11} - k_1)Y_2 + (k_1 - k_{11})Y_3 + Y_6 - Y_8 + Y_{11};$
3.	$X_3 - X_4 = -Y_3 + Y_4;$
4.	$c_1X_2 + k_{3ТВЛ}k_{4ТВЛ}X_4 + k_{4ТВЛ}X_5 = c_1k_{10}Y_2 - c_1k_{10}Y_3 + 0,5c_1Y_6 + c_2Y_7 - Y_8 + c_1Y_{10} + c_1Y_{11};$
5.	$(1 - 0,5c_1)X_2 - X_3 - k_{ПТВЛ}X_4 - X_6 = -(1 - 0,5c_1)Y_1 + (1 - 0,5c_1)k_{10}Y_2 + (1 - k_{10} + 0,5c_1k_{10})Y_3 + 0,5(1 - 0,5c_1)Y_6 - 0,5c_2Y_7 - 0,5c_1Y_{10} + (1 - 0,5c_1)Y_{11};$
6.	$X_7 = -k_{3ТНД}Y_4 + k_{3ТНД}Y_5 + \frac{1}{k_{4ТНД}}Y_8 - \frac{1}{k_{4ТНД}}Y_9;$
7.	$X_7 + X_8 = -(k_{3ТНД} + k_{ПТНД})Y_4 + (k_{3ТНД} + k_{ПТНД})Y_5 - 0,5Y_8 - c_{гд} \alpha_1 \cdot \alpha_1 Y_{12};$
8.	$X_3 + (k_{ПТВЛ} - 0,5k_{3ТВЛ}k_{4ТВЛ})X_4 - 0,5k_{4ТВЛ}X_5 + X_6 - X_8 = -Y_3 + (1 - k_{ПТНД})Y_4 - k_{ПТНД}Y_5 + c_{гд} \alpha_1 \cdot \alpha_1 Y_{12};$
9.	$X_9 = -Y_{10}.$
ШУКАНІ ЗМІНИ ДІАГНОСТИЧНИХ ОЗНАК	
$X_1 = \delta \xi_k$	- відносна зміна ККД ОК, пов'язана зі змінов в його проточній частині;
$X_2 = \delta \xi_{В,зоп}$	- відносна зміна витрати повітря через ОК, пов'язана з захараченням прохідних перерізів в спупеней;
$X_3 = \delta \xi_{кс}$	- відносна зміна коефіцієнта відновлення повного тиску в КС;
$X_4 = \delta \Pi_{ТВЛ}^*$	- відносна зміна степені розширення робочого тіла в турбіні високого тиску;
$X_5 = \delta \xi_{ТВЛ}$	- відносна зміна ККД турбіни високого тиску;
$X_6 = \delta \xi_{ТВЛ}'$	- відносна зміна коефіцієнта витрат турбіни високого тиску;
$X_7 = \delta \xi_{ТНД}$	- відносна зміна коефіцієнта корисної дії турбіни низького тиску;

ШУКАНІ ЗМІНИ ДІАГНОСТИЧНИХ ОЗНАК	
$Y_3 = \delta \mu_{ГТЛ}$	- відносна зміна коефіцієнта витрат турбіни низького тиску;
$X_9 = \delta \eta_{ГПА}$	- відносна зміна ККД газоперекачуючого агрегату
ЗМІНА ВИМІРЯНИХ ПАРАМЕТРІВ	
$Y_1 = \delta P_{O0}^*$	- відносна зміна тиску атмосферного повітря;
$Y_2 = \delta P_{O1}^*$	- відносна зміна тиску на вході в ОК;
$Y_3 = \delta P_{O2}^*$	- відносна зміна тиску на виході ОК;
$Y_4 = \delta P_{O4}^*$	- відносна зміна тиску за турбінов високого тиску;
$Y_5 = \delta P_{O5}^*$	- відносна зміна тиску за турбінов низького тиску;
$Y_6 = \delta T_{O0}^*$	- відносна зміна температури атмосферного повітря;
$Y_7 = \delta T_{O2}^*$	- відносна зміна температури за ОК;
$Y_8 = \delta T_{O4}^*$	- відносна зміна температури за турбінов високого тиску;
$Y_9 = \delta T_{O5}^*$	- відносна зміна температури за турбінов низького тиску;
$Y_{10} = \delta G_T$	- відносна зміна витрат паливного газу;
$Y_{11} = \delta g_{АНТ}$	- відносна зміна витрат повітря на роботу системи антиайсінгу;
$Y_{12} = \delta \alpha_1$	- відносна зміна на виході із соплового апарату турбіни низького тиску

леннях діагностичних ознак (табл. 2); Q - прямокутна матриця коефіцієнтів при малих відхиленнях вимірюваних параметрів (табл. 3).

Розв'язок системи рівнянь $X = P^{-1} \cdot QY = RY$ полягає в знаходженні елементів матриці $R = P^{-1} \cdot Q$ і проводиться на ЕОМ шляхом використання стандартних програм обертання і перемноження матриць.

В роботі проведено аналіз мінімально достатньої кількості контрольованих параметрів циклу ГПА та встановлено, які параметри найбільш доцільно контролювати на працюючому ГПА при включенні другої підсистеми локалізації несправностей для розв'язку системи діагностичних рівнянь. Коефіцієнти лінеаризації системи діагностичних рівнянь визначаються за допомогою безпосередньо вимірних параметрів циклу ГПА, характеристик елементів агрегату та універсальних

Таблиця 2

Загальний вигляд матриці Р коефіцієнтів при шуканих діагностичних ознаках

P	X ₁	X ₂	X ₃	X ₄	X ₅	X ₆	X ₇	X ₈	X ₉
1	I	0	0	0	0	0	0	0	0
2	I	0	0	$(K_{4\text{ТВД}} + 1) \cdot K_{4\text{ТВД}}$	$K_{4\text{ТВД}} + 1$	0	0	0	0
3	0	0	I	$-I$	0	0	0	0	0
4	0	C _I	0	$K_{3\text{ТВД}} \cdot K_{4\text{ТВД}}$	$K_{4\text{ТВД}}$	0	0	0	0
5	0	$1 - 0,5C_1$	-I	$-K_{\text{ПТВД}}$	0	-I	0	0	0
6	0	0	0	0	0	0	I	0	0
7	0	0	0	0	0	0	I	I	0
8	0	0	I	$K_{\text{ПТВД}} - 0,5 \cdot K_{3\text{ТВД}} \cdot K_{\text{ПТВД}}$	$-0,5K_{4\text{ТВД}}$	I	0	-I	0
9	0	0	0	0	0	0	0	0	I

характеристик, методів приведення параметрів, розроблених в роботі. Наведені результати розрахунків зниження ККД осьового компресора ГТК-251 в процесі експлуатації внаслідок забруднення проточної частини і побудовано графік зміни відносного віхилення даної діагностичної ознаки в залежності від часу.

Четвертий розділ дисертації присвячено розробці методів прогнозування технічного стану ГПА для розв'язання задачі оптимального планування технічного обслуговування агрегатів. Ефективність діагностування істотно підвищується, коли при проведенні контрольних операцій розв'язується задача прогнозування зміни технічного стану ГПА в майбутні проміжки часу. Прогноз стану полягає у визначенні моменту часу виникнення несправності та досягнення ГПА стану втрати робоздатності. Ця інформація є базовою для планування термінів та обсягів технічного обслуговування та ремонтів, оптимізації режимів роботи, необхідного обсягу постачання запасними частинами. Розв'язання цієї задачі технічного діагностування дасть змогу перейти до обслуговування обладнання за його технічним станом, визначити оптимальні терміни проведення планово-попереджувальних ремонтів.

Для короткострокового прогнозування хороший результат дає апроксимація характеру зміни параметрів лінійними залежностями. Коє-

Таблиця 3

Загальний вигляд матриці Q коефіцієнтів при малих відхиленнях вимірних параметрів

Q	Y_1	Y_2	Y_3	Y_4	Y_5	Y_6	Y_7	Y_8	Y_9	Y_{10}	Y_{11}	Y_{12}
1	0	$K_{11} - K_1$	$K_1 - K_{11}$	0	0	$1/K_2$	$-1/K_2$	0	0	0	0	0
2	0	$K_{11} - K_1$	$K_1 - K_{11}$	0	0	I	0	-I	0	0	I	0
3	0	0	-I	I	0	0	0	0	0	0	0	0
4	0	$C_1 K_{10}$	$-C_1 K_{10}$	0	0	$0,5 C_1$	C_2	-I	0	C_I	C_I	0
5	$-1 + 0,5 C_1$	$(1 - 0,5 C_1) \cdot K_{10}$	$1 - K_{10} + 0,5 C_1 K_{10}$	0	0	$0,5 \cdot (1 - 0,5 C_1)$	$-0,5 C_2$	0	0	$-0,5 C_1$	$1 - 0,5 C_1$	0
6	0	0	0	$-K_{3TНЛ}$	$K_{3TНЛ}$	0	0	$1/K_{2TНЛ}$	$-1/K_{4TНЛ}$	0	0	0
7	0	0	0	$-K_{3TНЛ} + K_{1TНЛ}$	$K_{3TНЛ} + K_{1TНЛ}$	0	0	-0,5	0	0	0	$-\operatorname{ctg} \alpha_1 \cdot d_1$
8	0	0	-I	$1 + K_{2TНЛ}$	$-K_{2TНЛ}$	0	0	0	0	0	0	$\operatorname{ctg} \alpha_1 \cdot d_1$
9	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-I	0	0

фіцієнти поліномів одержано на основі методу найменших квадратів.

Інформація про характер зміни діагностичних параметрів обладнання є основною для оцінки технічного стану агрегату, попередження аварійних відказів і планування термінів та заходів по обсягу ремонтних робіт.

В роботі проведено оцінку адекватності запропонованих математичних моделей розрахунку характеристик основних елементів ГПА та математичних моделей при ведення робочих параметрів агрегату при зміні зовнішніх умов та навантаження методом малих відхилень за допомогою порівняння прогнозованих (розрахункових по моделях) та фактичних (вимірних) параметрів режимів роботи ГПА. Порівняння показало, що максимальне розходження між ними не перевищує 6,3 %. Це дає змогу ствердження адекватності розроблених математичних моделей та можливості використання їх для цілей діагностування ГПА.

ВИСНОВКИ

1. Запропоновано системний підхід, який базується на ієрархічних рівнях діагностування основних несправностей газоповітряних трактів ГПА типів ГТК-101 та ГТК-251.

2. Розроблено математичні моделі розрахунку та здійснена їх ідентифікація характеристик основних елементів ГПА (на базі середньострумєневих розрахунків течії та експериментальних даних геометричних параметрів проточних частин елементів), що дозволило оцінити енергетичні втрати в елементах ГПА (в тому числі системи антиайсінгу) та побудувати графіки універсальних характеристик.

3. На основі побічної зміни термогазодинамічних параметрів робочих циклів агрегатів запропонована система діагностичних лінеаризованих рівнянь на базі методу малих відхилень.

4. Встановлено мінімально необхідну кількість вимірваних параметрів для системи діагностичних рівнянь, що в подальшому дозволило забезпечити найвищу інформативність системи при найменших втратах на її обладнання.

5. Оцінена адекватність запропонованих математичних моделей побудови характеристик основних елементів ГПА та приведених робочих параметрів при зміні навантаження та зовнішніх впливів шляхом порівняння прогнозованих і фактичних параметрів. Розходження між ними не перевищує 6,3 %, що дозвол з рекомендувати методики до

практичного використання.

6. Запропоновано метод прогнозування залишкового ресурсу експлуатації агрегатів, який базується на аналізі тренду експлуатаційних показників ГПА (зокрема ККД агрегату) методами математичної статистики, що обумовило можливість вдосконалення системи планування профілактичного обслуговування обладнання компресорних станцій. Впровадження методу прогнозування залишкового ресурсу експлуатації агрегатів на Гусятинській та Барській компресорних станціях в 1991 році обумовило економічний ефект в розмірі 162,2 тис. крб.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ ДИСЕРТАЦІЇ ВИКЛАДЕНИЙ В ТАКИХ ПРАЦЯХ:

1. Избаш В.И., Коршунов С.Н. Динамика изменения рабочих характеристик нагнетателей в период их эксплуатации / Тезисы доклада Всесоюзной конференции "Проблемы научно-технического прогресса в трубопроводном транспорте газа Западной Сибири", Тюмень, 1987.
2. Грузд В.Я., Тимкив Д.Ф., Избаш В.И. Выбор рациональных стратегий обслуживания ГПА методами теории игр / Тезисы доклада на Всесоюзной научно-технической конференции "Проблемы научно-технического прогресса в трубопроводном транспорте газа Западной Сибири", Тюмень, 1987.
3. Избаш В.И., Бабенко А.Н. Модернизация схемы маслоснабжения турбоагрегатов ГТК-101 и ГТК-251 / Газовая промышленность, № 3, 1989.
4. Избаш В.И., Бабенко А.Н. Модернизация схемы циркуляции утилизаторов на КС / Газовая промышленность, № 5, 1989.
5. Избаш В.І. Математичне моделювання газодинамічних процесів в осьовому компресорі ГТУ / Тези доповіді на II-тій конференції професорсько-викладацького складу Івано-Франківського інституту нафти і газу, Івано-Франківськ, 1993.
6. Грузд В.Я., Избаш В.І. Принципи побудови математичної моделі ГПА з метов діагностування його стану / Тези доповіді на II-ій конференції професорсько-викладацького складу Івано-Франківського інституту нафти і газу, Івано-Франківськ, 1993.

Избаш В.И.

Підписано до друку 03.06.94 р., ф. 60 х 84,
I/I6, зем. I25, др.арк. I, тираж 100 прим.
Івано-Франківський державний технічний
університет нафти і газу.
Дільниця оперативної поліграфії, Копетська 15.

458164

AB 30.494