

УДК 621.455

С.В. ЄМЕЛЬЯНОВ, Л.С. ФОНАР
Одеський національний політехнічний університет

ВИЗНАЧЕННЯ СТАЦІОНАРНОГО РЕЖИМУ РОБОТИ РОТОРНОЇ МАШИНИ

Вимірювані параметри роторних машин повинні задовольняти вимогам вірогідності одержуваних значень і припускати участь оператора в процесі оцінки вірогідності параметрів. Наявність декількох режимів роботи працюючого агрегату впливає на вибір застосовуваних методів діагностування. Введення до складу систем керування роторних машин модулів обробки даних дозволяє виконувати діагностування агрегату під час його роботи, та не потребує його зупинки на час аналізу. Розроблено алгоритм для попередньої обробки даних, що надаються від газотурбінної установки. Показано, що алгоритм виявляє завершення зони тренду і наявність ділянок зі значними коливаннями параметра, у тому числі й початок зміни режиму роботи.

Ключові слова: роторні машини, газотурбінні двигуни, обробка даних, діагностика двигунів.

С.В. ЕМЕЛЬЯНОВ, Л.С. ФОНАРЬ
Одесский национальный политехнический университет

ОПРЕДЕЛЕНИЕ СТАЦИОНАРНОГО РЕЖИМА РАБОТЫ РОТОРНОЙ МАШИНЫ

Измеряемые параметры роторных машин должны удовлетворять условиям вероятности получаемых значений и допускать участие оператора в процессе оценки вероятности параметров. Наличие нескольких режимов работы работающего агрегата влияет на выбор применяемых методов диагностики. Введение в состав систем управления роторных машин модулей обработки данных позволяет использовать диагностику агрегата во время его работы, и не требует его остановки на время анализа. Разработан алгоритм предварительной обработки данных, которые поступают от газотурбинной установки. Показано, что алгоритм выявляет окончание зоны тренда и наличие участков со значительными колебаниями параметра, в том числе и начало изменения режима работы

Ключевые слова: роторные машины, газотурбинные двигатели, обработка данных, диагностика двигателей.

S.V. YEMELYANOV, L.S. FONAR
Odessa National Polytechnic University

DETERMINATION OF THE STATIONARY OPERATION MODE OF THE ROTARY MACHINE

Measured parameters of rotary machines must satisfy the conditions of probability of the obtained values and allow the participation of the operator in the process of estimating the probability of the parameters. The peculiarity of the currently used methods of parametric diagnosis, based on the analysis of the thermogasdynamic parameters of the unit, is the requirement to apply the measured parameters obtained after the work of the rotary machine for some time in a stationary (unchanged) mode. Methods of technical diagnosis clearly require the selection of two modes of work: stationary and changing. In this case, this is due to the need to use different algorithms to evaluate the parameters of the object. The presence of several operating modes of the operating unit affects the choice of the diagnostic methods used. The purpose of the study is to search and develop methods for processing data and solutions for the construction of systems and individual nodes, which provide diagnosis of the technical and functional state of the rotary machine in transient operating modes. The introduction of the data processing modules in the control systems of rotary machines makes it possible to use the diagnostics of the unit during its operation, and does not require its stopping at the time of analysis. The given algorithm was used for preliminary processing of the data obtained from the gas turbine installation. The data acquisition frequency was set at 1 Hz. The averaging interval of the data was chosen equal to $N=10$ and was determined by the known values of the constant time of the control system and the unit itself. It is shown that the algorithm reveals the end of the trend zone and the presence of areas with significant parameter variations, including the beginning of the change in work mode.

Keywords: rotary machines, gas turbine engines, data processing, engine diagnostics.

Постановка проблеми

Розповсюдженим способом одержання достовірних результатів вимірів є усереднення показань за заданий інтервал. При цьому передбачається, що випадковий процес є ергодичним нормальним законом розподілу. На практиці це не завжди виконується, тому що наявність детермінованої зміни параметрів і випадкових перешкод імпульсного походження істотно спотворює розподіл параметрів і в остаточному підсумку приводить до одержання зміщеної оцінки параметра. Загальний підхід до її рішення складається у виключенні з аналізу викидів пов'язаних із промахами вимірів і оцінки середнього значення параметра на інтервалі, протягом якого можна процес уважати стаціонарним. Однак при виборі методики, як правило, не враховують властивості об'єкта контролю, параметри якого досліджуються, і, відповідно, обраний метод обробки може не забезпечити одержання достовірної оцінки параметра. При реалізації процедур технічного діагностування задача одержання достовірної оцінки параметрів процесу також може бути вирішена шляхом усереднення. Рішення бачиться в обліку властивостей об'єкта контролю й системи виміру при виборі методу попередньої обробки даних.

Вимірювані параметри роторних машин (газотурбінні двигуни, компресорні установки, теплові турбіни, електропривод та ін.), передані в систему діагностування, повинні задовольняти вимогам вірогідності одержуваних значень і припускають участь оператора в процесі оцінки вірогідності параметрів. Одним з таких напрямків є введення до складу систем керування роторних машин модулів обробки даних, що виконують діагностування агрегату.

Величина змін параметрів залежить від механізму їх прояву і може мати характер тренда або шумоподібних відхилень параметрів від середніх значень. Зміна параметрів, які визначають режим роботи роторної машини (значення оборотів роторів, положення дозатора палива, положення регулюючої заслінки і ін.) призводить до зміни інших параметрів, вона носить інерційний характер і протягом деякого часу не відповідає значенням, що досягаються при роботі агрегату на стаціонарному режимі.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

У системах технічного діагностування нестационарність режиму роботи впливає на алгоритми оцінки параметрів процесу, наприклад, пов'язаних з виміром амплітуд гармонійних складових, що змінюються по частоті [1–4]. Спільне використання декількох систем керування й збору даних, що є звичайним у промислових умовах, приводить до прояву взаємних перешкод (особливо імпульсного типу внаслідок спрацьовування виконавчих механізмів).

Особливістю відпрацьованих у цей час методів параметричного діагностування, заснованих на аналізі термогазодинамічних параметрів агрегату, є вимога про застосування вимірюваних параметрів, одержуваних після роботи роторної машини протягом деякого часу на стаціонарному (незмінному) режимі [1, 2]. Методи технічного діагностування явно вимагають виділення двох режимів роботи: стаціонарного й що змінюється. У цьому випадку це пов'язане з необхідністю застосування різних алгоритмів оцінки параметрів об'єкта.

Розходження також полягають у можливості проведення різних операцій, пов'язаних з обслуговуванням і технічним діагностуванням агрегату. Фактично при зупиненому встаткуванні можна робити операції, пов'язані з неруйнуючим контролем, оцінка ж експлуатаційних характеристик повною мірою може бути проведена при працюючому агрегаті [3, 5].

В умовах експлуатації величини відхилень параметрів набагато перевищують ті, які досягаються в стендових умовах і, відповідно, забезпечити безперервність виконання умов діагностування не представляється можливим. Якщо зміни параметрів носять характер випадкових відхилень від середніх значень і реакція машини може бути представлена лінійною динамічною моделлю, то є припустимим визначення середніх значень інших параметрів. Для більшості роторних машин таким допустимим інтервалом є діапазон 2–5% щодо середніх значень параметрів.

В методиці проведення випробувань газотурбінних установок [6] зазначено, що протягом часу не менше 30–60 хвилин відхилення вимірюваних параметрів не повинно перевищувати 0.2% від очікуваного середнього значення, а для ряду параметрів вказані абсолютні величини відхилень. Тим часом, як впливає з практики реалізації методів діагностування, просте зведення задачі до пошуку критеріїв стаціонарності, які до того ж затратні в обчислювальному плані, не забезпечує отримання достовірних даних для виконання діагностування, так як не враховуються динамічні властивості самої роторної машини і параметри системи вимірювань.

Датчики фізичних величин і первинні підсилювачі, орієнтовані на формування сигналів, мають смугу пропускання не більше 1 Гц (в ряді випадків до 10 Гц), що пов'язано з відсутністю необхідності контролю швидких змін параметрів і для забезпечення завадостійкості вимірювальних каналів. У більшості випадків допустимим є фіксація даних з інтервалом 1–10 с (збільшення інтервалу між вибірками скорочує обсяг інформації, що зберігається). Таке рішення допустимо, так як роторні машини мають природну інерційність на зміни зовнішніх умов, а в системах управління реалізовані алгоритми плавної зміни режиму роботи для збереження газодинамічної стійкості агрегату.

Наявність декількох режимів роботи працюючого агрегату впливає на вибір застосовуваних методів діагностування. Під стаціонарністю режиму роботи роторної машини будемо розуміти збереження значень її термогазодинамічних параметрів (включаючи параметри робочого тіла на вході в агрегат), технічних характеристик вузлів, параметрів віброакустичної активності й величин оборотів роторів, які визначають режим роботи агрегату [1, 6].

Мета дослідження

Мета дослідження - пошук і розробка методів обробки даних і рішень по побудові систем й окремих вузлів, що забезпечують діагностування технічного й функціонального стану роторної машини на перехідних режимах роботи.

Приймемо, що виконуються наступні умови:

- роторна машина працює на незмінному режимі, зміни технічних характеристик практично відсутні;
- інтервали вибірок даних у декілька разів менші, ніж інтервали часу, що відповідають одному й тому ж режиму роботи роторної машини.

В цьому випадку можна говорити, що є надлишкова інформація, яка надходить від системи вимірювань. Для проведення діагностування немає необхідності використання всіх даних, отриманих при роботі на незмінній ділянці, досить використання усереднених оцінок параметрів.

Викладання основного матеріалу дослідження

Алгоритм попередньої обробки даних складається з наступної послідовності операцій:

- 1) Виконання медіанної фільтрації при довжині фільтру $N/2$ (поточкова обробка);
- 2) Розрахунок середнього значення параметру на інтервалі N (блочна обробка).

Наведений алгоритм був використаний для попередньої обробки даних, отриманих від газотурбінної установки. Частота отримання даних була задана у 1 Гц. Інтервал усереднення даних був обраний рівним $N=10$ та визначався відомими значеннями постійних часу системи управління та самого агрегату.

Додатково проводиться обчислення середньоквадратичного відхилення (СКВ) для отримання можливості виявлення значних відхилень параметрів, які можливі при істотних відмовах в роботі вимірювальної апаратури, але даний параметр в подальшому для діагностування не використовується.

Реалізовано наступну методику оцінки стаціонарності (незмінності) параметра в заданій вибірці:

- 1) Обчислюються значення СКВ і подвійного розмаху параметрів у вибірці даних;
- 2) Якщо величини менше нижніх границь допусків, то процес вважається стаціонарним і подальший аналіз не проводиться;
- 3) Якщо величини більше верхніх границь допусків, то процес вважається нестаціонарним і подальший аналіз не проводиться;
- 4) Якщо величини менше верхніх границь допусків, то виробляється розрахунок критеріїв стаціонарності, при їхньому виконанні процес вважається стаціонарним.

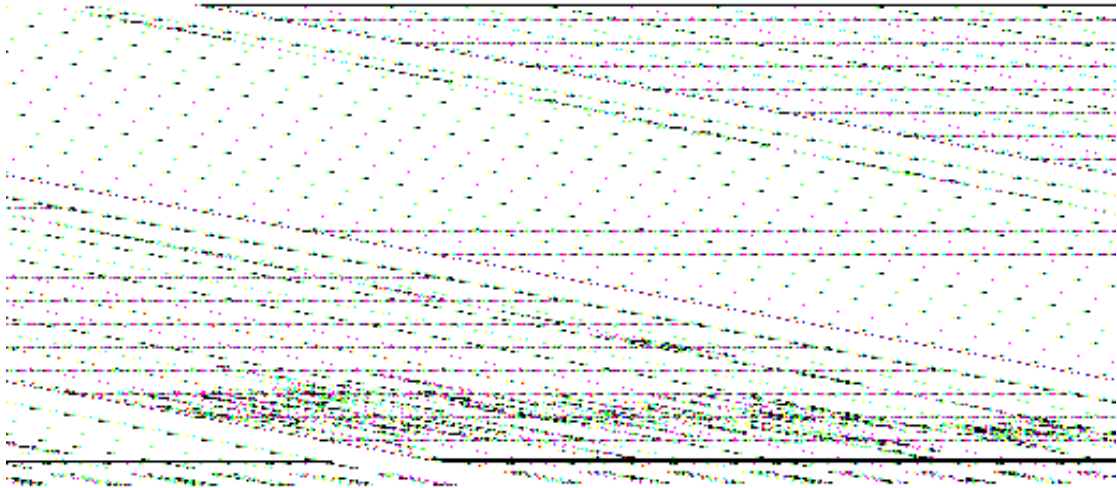
З урахуванням параметрів конкретного агрегату були задані наступні параметри алгоритму:

- нижня границя СКВ - 0.5% або 1% від максимального значення параметра;
- верхня границя СКВ - 2% від максимального значення параметра;
- нижня границя подвійного розмаху - 2% від максимального значення параметра;
- верхня границя подвійного розмаху - 4% від максимального значення параметра;
- довірча ймовірність для критеріїв стаціонарності - 0.95.

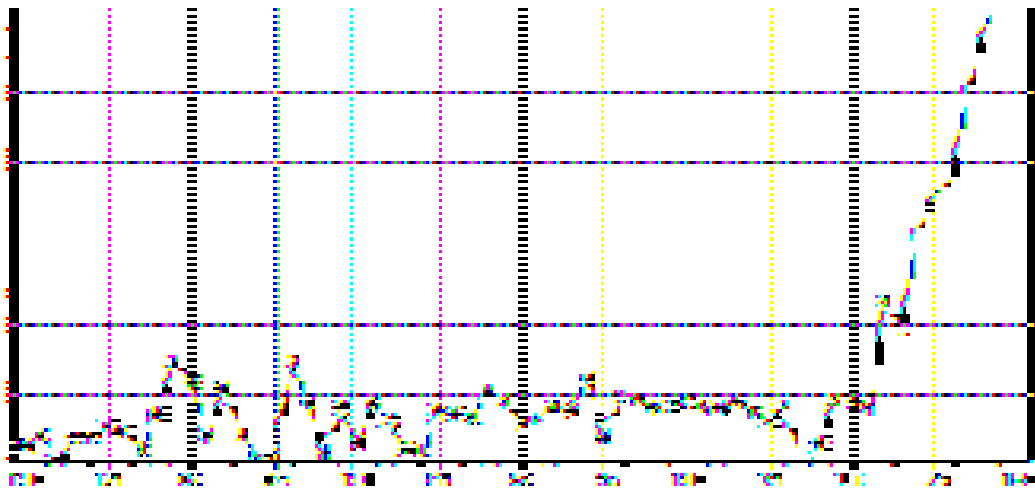
Вибір нижніх границь заснований на обліку рівня перешкод, внесених системою вимірів і припустимим інтервалом виміру параметрів, які нормовані для стендових випробувань, урахувалися також вимоги нормативних документів [6].

Вибір верхніх границь заснований на використанні даних попередніх випробувань агрегату, у ході яких був установлений діапазон зміни параметрів, при яких зміна режиму роботи може бути описана лінійними рівняннями. Отримані значення характерні для всіх установок даного типу. Використання в якості базових граничних значень параметрів припустимо, тому що при зниженні потужності агрегату зона лінійного відгуку збільшується.

Прийнята величина довірчої ймовірності приводить до прояву наступної властивості алгоритму – якщо відбувається стрибкоподібна зміна рівня параметра, то в плінні наступних шести циклів розрахунків продовжують виконуватися умови критеріїв стаціонарності (рис. 1), що відповідає теорії. Тому при виборі границь подвійного розмаху було враховано, що повинне забезпечуватися виявлення початку зміни режиму роботи агрегату.



а)



б)

Рис.1. Порівняння рішень алгоритмів оцінки стаціонарності параметра (імітаційне моделювання): а) відсутність контролю; б) наявність контролю за величиною СКВ і подвійного розмаху

Практичне застосування алгоритму показало його ефективність у виявленні інтервалів незмінності вимірюваних параметрів агрегату (рис. 2, 3), мітками у вигляді зірочок відзначені праві границі інтервалів часу:

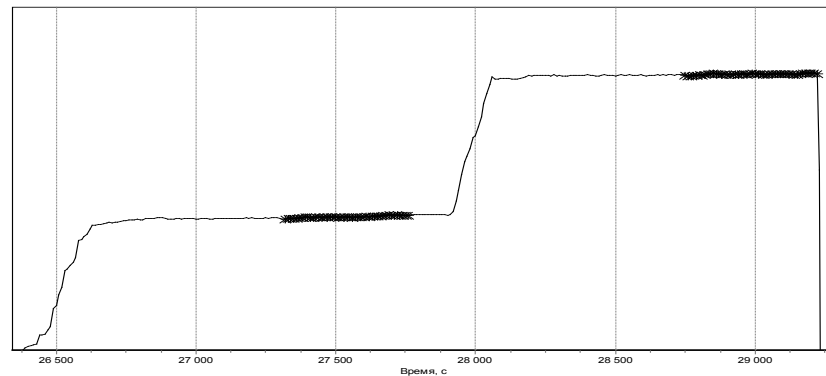


Рис. 2. Відображення моментів часу, у яких виконувалися умови незмінності для різних параметрів на заданому інтервалі (експериментальні дані), завершення зон тренду

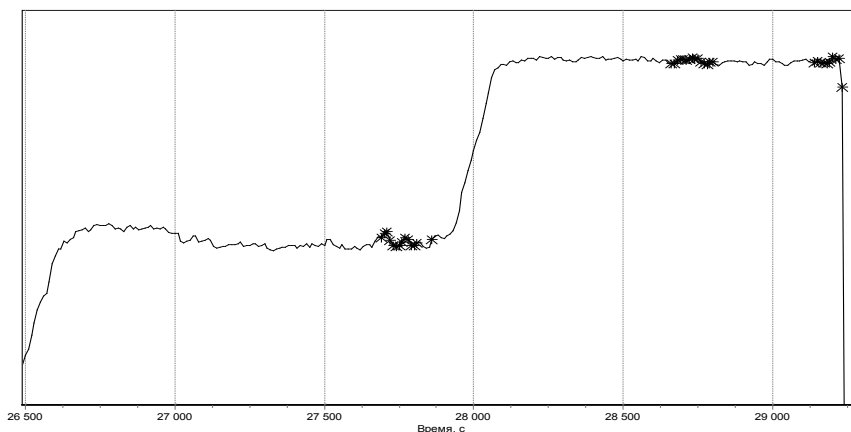


Рис. 3. Відображення моментів часу, у яких виконувалися умови незмінності для різних параметрів на заданому інтервалі (експериментальні дані), ділянки з коливаннями параметру

Висновки

З аналізу графіків видно, що алгоритм стійко виявляє завершення зони тренду (рис. 2) і наявність ділянок зі значними коливаннями параметра (рис. 3), у тому числі й початок зміни режиму роботи (крайня права мітка).

Запропоновані методики попередньої обробки даних були реалізовані за допомогою програмного комплексу параметричного діагностування й показали свою ефективність у ході експлуатації.

Список використаної літератури

1. Кулик М. С. Теория компрессоров и газотурбинных установок / М. С. Кулик, В. Г. Моца, М. Т. Шпакович – К.: НАУ, 2002. — 220 с.
2. Теория, расчет и проектирование авиационных двигателей и энергетических установок: Учебник. Кн.. 3. Основные проблемы: Начальный уровень проектирования, газодинамическая доводка, специальные характеристики и конверсия авиационных ГТД / В. В. Кулагин, С. К. Бочкарев, И. М. Горюнов и др.; Под общ. ред. В. В. Кулагина – М.: Машиностроение, 2005. — 464 с.
3. Емельянов С.В. Определение источника паразитных колебаний в роторной машине путем анализа их взаимосвязи с режимными параметрами / С.В. Емельянов, Е.И. Лоза, И.А. Янов // Современные информационные и электронные технологии "СИЭТ – 2010": – Одесса: Изд-во Политехпериодика, 2016. – Вып. 17. — С. 52 – 53.
4. Фонар Л.С. Синтез цифровых фильтров у динамічному стані / Ю.О. Бабій, Л.С. Фонар, О.В. Худецький // Збірник наукових праць Національної академії державної прикордонної служби України. Серія: військові та технічні науки. — Вип. 2(64). — С. 123 – 130.
5. Хашемиан Х. М. Датчики технологических процессов: характеристики и методы повышения качества / Х. М. Хашемиан — М.: Издательство Бинوم, 2008. — 336 с.
6. ГОСТ Р 52782-2007. Установки газотурбинные. Методы испытаний. Приемочные испытания