

УДК 681.518.54

В.Ф. МИРГОРОД, Г.С. РАНЧЕНКО*ОАО «Элемент», Одесса, Украина*

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ МЕТОДОВ ДИАГНОСТИРОВАНИЯ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ДВИГАТЕЛЯ ГАЗОТУРБИННОГО ПРИВОДА ПО ДАННЫМ РЕГИСТРАЦИИ

Проведено сопоставление и анализ методов приведения к базовому режиму, построения диагностической модели и факторного анализа применительно к задаче диагностирования технического состояния газотурбинного двигателя в длительной эксплуатации.

техническая диагностика, регрессионная модель, методы главных компонент и факторного анализа

Введение

Важным проблемным вопросом совершенствования автоматизированных систем диагностирования (АСД) является повышение надежности статических выводов о техническом состоянии двигателя в процессе его длительной эксплуатации по данным регистрации изменения параметров по наработке. Получаемые базы данных (БД) представляют собой совокупность временных рядов и могут рассматриваться как объект исследования общих закономерностей их изменения с помощью методов прикладной статистики, в частности, регрессионного и факторного анализа. Условия и особенности применения таких методов могут быть установлены по результатам диагностирования двигателя в реальных условиях эксплуатации.

Постановка проблемы и цель исследования. Реализуемые и проектируемые АСД газоперекачивающих агрегатов на основе газотурбинных приводов (ГТП) достигли в настоящее время достаточно высокого уровня технического совершенства [1 – 5] и позволяют с высокой вероятностью прогнозировать развитие аварийных ситуаций [1, 4]. В передовых АСД используются методы нелинейной аппроксимации характеристик [2], полиномиальная регрессионная аппроксимация трендов [3], прогнозирование

на основе имитационных моделей [5]. В то же время недостаточное внимание уделяется анализу условий корректного применения тех или иных методов диагностирования применительно к реальным данным регистрации, их чувствительности к отличиям используемых статистических моделей от реальных, сопоставления различных методов по эффективности и сложности реализации.

Целью настоящего исследования является оценка технического состояния и сравнительный анализ методов диагностирования газотурбинного двигателя в составе ГТП по реальным данным изменения параметров в процессе длительной эксплуатации.

Основные результаты исследований

1. Объект исследования и типовая методика диагностирования. Объектом исследования являются базы данных регистрации основных параметров $N_{ВД}$, $N_{НД}$, $P_{КВД}$, $T_{ТНД}^*$, $P_{вх}$, $T_{вх}^*$ газотурбинного двигателя в составе ГТП в процессе нормальной эксплуатации длительностью ~18 мес. с наработкой 5650 часов. Фрагмент БД параметров регистрации приведен на рис. 1.

Типовая методика диагностирования заключается в приведении параметров к стандартным атмосферным условиям (С.А.У.) согласно следующим известным формулам:

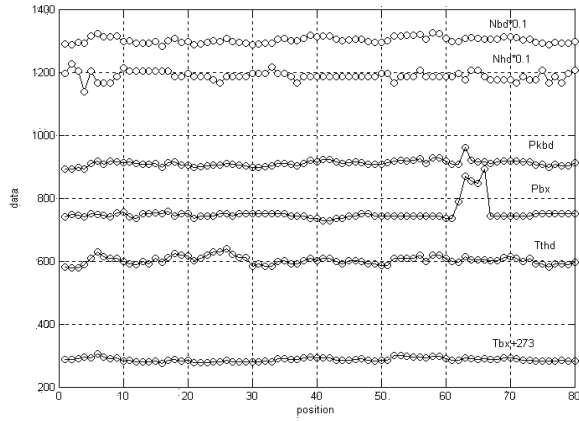


Рис. 1. Выборка изменения параметров регистрации

$$N_{ВДпр} = N_{ВДизм} \cdot \sqrt{288 / (T_{ex}^* + 273)}; \quad (1)$$

$$N_{НДпр} = N_{НДизм} \cdot \sqrt{288 / (T_{ex}^* + 273)}; \quad (2)$$

$$P_{КВДпр} = P_{КВДизм} \cdot 760 / P_{ex} + 101; \quad (3)$$

$$T_{ТНДпр}^* = \left[(T_{ТНДизм}^* + 273) \cdot \frac{288}{T_{ex}^* + 273} - 273 \right], \quad (4)$$

с последующим приведением параметров к базовому режиму:

$$\Delta N_{ВДпр} = N_{ВДк} - N_{ВДпр}; \quad (5)$$

$$\left. \begin{aligned} N_{НДпрк} &= N_{НДпр} - k_{НД} \cdot \Delta N_{ВДпр}; \\ P_{КВДпрк} &= P_{КВДпр} - k_p \cdot \Delta N_{ВДпр}; \\ T_{ТНДпрк}^* &= T_{ТНДпр}^* - k_T \cdot \Delta N_{ВДпр} \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

и вычислением отклонений от этого режима:

$$\left. \begin{aligned} \Delta N_{НДпр} &= N_{НДпрф} - N_{НДпрк}; \\ \Delta P_{КВДпр} &= P_{КВДпрф} - P_{КВДпрк}; \\ \Delta T_{ТНДпр}^* &= T_{ТНДпрф}^* - T_{ТНДпрк}^* \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

В формулах (6) коэффициенты крутизны характеристик ГТД и формулярные параметры в (7) индивидуализированы применительно к конкретному экземпляру двигателя.

Контролю подлежит нахождение отклонений (7) в заданных допусках ± 200 об/мин для $N_{НД}$, ± 40 кПа для $P_{КВД}$ и $\pm 30^\circ$ для $T_{ТНД}$.

Результаты обработки БД по типовой методике приведены на рис. 2 – 4 (кривые 1). Их анализ дал основание предположить параметрический отказ

измерительного канала (ИК) по $P_{КВД}$ ввиду наличия значительного числа отклонений вне пределов заданного допуска, причем по критерию Смирнова нет основания полагать, что указанные отклонения являются случайными.

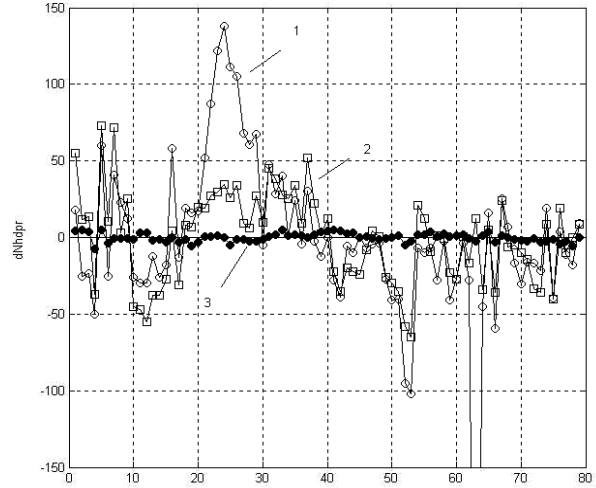


Рис. 2. Отклонения оборотов турбины низкого давления

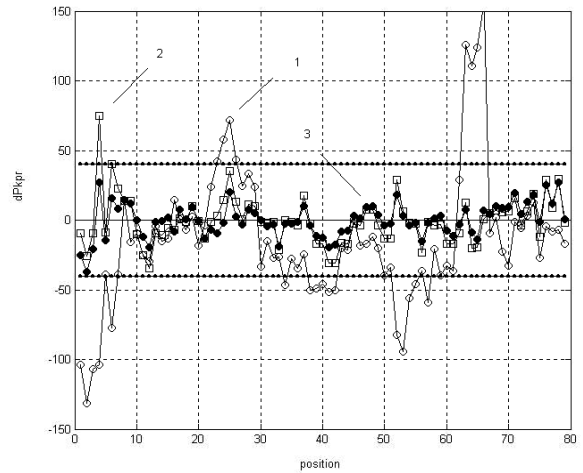


Рис. 3. Отклонения давления за компрессором.

Таким образом, следуя типовой методике, можно установить параметрический отказ ИК по $P_{КВД}$ и, предположительно, ненормальный режим ГТД на интервале (3560 – 4014) час.

2. Диагностирование по регрессионной модели. Очевидная неполнота типовой модели (1) – (7) заключается в весьма приближенном учете хода дроссельных характеристик реального двигателя, путем их линейной аппроксимации согласно (6), справедливой только при малых отклонениях. Од-

нако это условие не соблюдается для исследуемых БД регистрации.

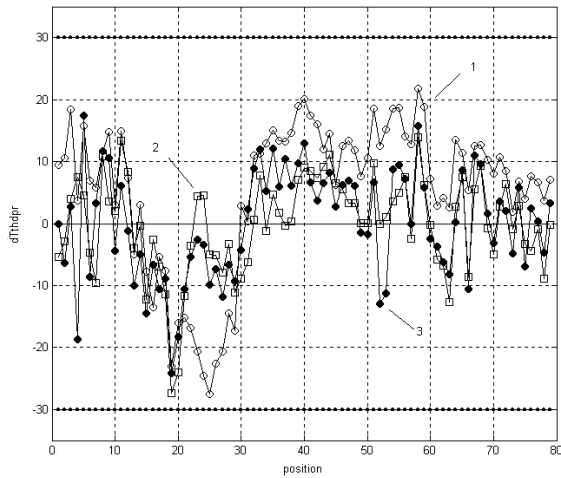


Рис. 4. Отклонения температуры за турбиной

Отображение реально реализуемой зависимости

$$P_{KBДнр} - P_{KBДнр} = f_P(\Delta N_{ВДнр}) \quad (8)$$

приведено на рис. 5 и иллюстрирует, во-первых, существенно нелинейный характер функции (8), и, во-вторых, серию аномальных отклонений от этой зависимости. После исключения указанных аномальных отклонений согласно [6] построена полиномиальная регрессионная модель (8) на основе МНК. Аналогичные модели построены по БД для параметров N_{HD} и T_{THD} . Для зависимости по N_{HD} также зафиксировано единичное аномальное отклонение уровнем >500 об/мин. После замены в (6) постоянных коэффициентов полученными нелинейными функциями временные ряды отклонений приобретают вид, представленный кривыми 2 на рис. 2 – 4. Как это следует из приведенных иллюстраций и выполненных расчетов, использование диагностических моделей существенно уменьшает разброс данных [7]. Предположение о ненормальном режиме ГТД, следующее из типовой методики диагностики может быть снято, аномальный единичный выброс по N_{HD} идентифицирован как случайный сбой регистрации, а что касается серии аномальных значений по $P_{KBД}$, то детальный анализ БД определил их причину в недостоверных значениях

P_{ex} на интервале (5068 – 5212) час. Действительно, СКО выборки $P_{KBДизм}$ составляет 13,92 кПа, а для P_{ex} – 27,94 кПа, а поскольку в (6) рассматривается отношение двух случайных величин, то его распределение существенно отличается от нормального [6].

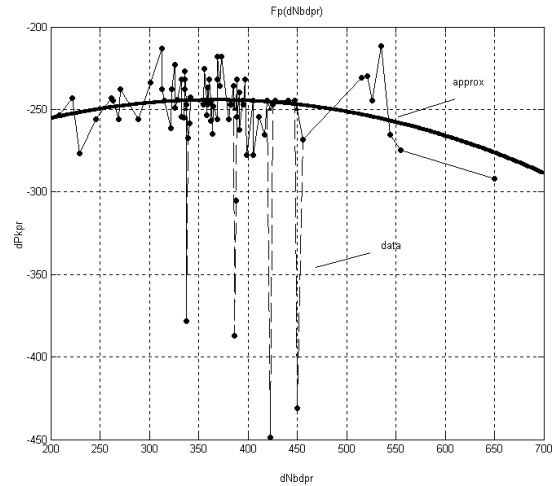


Рис. 5. Регрессионная модель

Таким образом, использование диагностической регрессионной нелинейной модели позволяет существенно уменьшить дисперсию остаточных отклонений и тем самым повысить надежность результатов диагностики. Появляются возможности идентифицировать аномальные отклонения и установить их причины. Однако регрессионные модели, так как основаны на МНК, имеют высокую чувствительность к нецензурированным выбросам в исходных данных и требуют их предварительной обработки в виде, как это представлено на рис. 5.

3. Диагностирование методами главных компонент и факторного анализа. Дальнейшее уменьшение дисперсии остаточных отклонений и идентификация состояния объекта за счет исключения не связанных с его состоянием факторов может быть достигнуто на основе применения к выборке параметров регистрации методов главных компонент (МГК) и факторного анализа (МФА).

Будем полагать, что параметры регистрации образуют вектор

$$x^{(m)} = col(N_{ВДнр}, P_{KBДнр}, N_{HDнр}, T_{THДнр}^*, T_{ex}^*, P_{ex})$$

а их совокупность – матрицу наблюдений X . Тогда строки этой матрицы можно полагать признаками объекта, а столбцы – его состояниями. Сингулярное разложение $m \times n$ матрицы наблюдений имеет вид [8]

$$X = USV^T = \sum_{i=1}^k \sigma_i u_i v_i^T, \quad (9)$$

где U , V – унитарные $m \times n$ матрицы, $S = \text{diag}(\sigma_1 \sigma_2 \dots \sigma_n 0 \dots 0)$, причем $\sigma_1 > \sigma_2 > \dots > \sigma_k$ – собственные числа матрицы XX^T , а матрица U составлена из ортонормированных собственных векторов. Следуя МФА, выполним следующее представление матрицы наблюдений

$$X = BF + N,$$

где F – матрица центрированных, независимых и нормированных факторных компонент; B – матрица факторных нагрузок; N – вектор остаточных несущественных факторов.

Компоненты матрицы F отыскиваются из выражения [9]

$$f^{(l)} = \frac{\sum_{i=1}^m u_i^{(l)} x_i}{\sqrt{\sum_{i,j=1}^m u_i^{(l)} u_j^{(l)} r_{ij}}}, \quad (11)$$

где $r_{ij} = \text{cor}(x_i, x_j)$; $u^{(l)} = \text{col}(u_1^{(l)} u_2^{(l)} \dots u_m^{(l)})$ – собственный вектор, отвечающий максимальному собственному значению λ_l .

Прямое определение матрицы F согласно (11) для каждого λ_l приводит к главным компонентам матрицы наблюдений. Идея МФА состоит в таком определении матрицы F , что первый из общих факторов находится из условия, чтобы попарные корреляции между исходными признаками были как можно меньше, если влияние этого фактора учтено [9]. Следующий общий фактор находится из условия максимального ослабления попарных корреляционных связей между исходными признаками, оставшимися после учета влияния первого общего фактора.

Результаты применения указанной процедуры

МФА к матрице наблюдений, составленной из приведенных согласно (1) – (6) параметров ГТД и параметров T_{ex}^* , P_{ex} , после учета первых двух факторов, имеющих наибольшие дисперсии, представлены кривыми 3 на рис. 2 – 4. Сопоставление с результатами диагностики по типовой методике и диагностическим моделям показывает существенное уменьшение остаточной дисперсии, в частности, по параметру $P_{\text{КВДнр}}$ СКО уменьшилось с 48,75 кПа до 11,98 кПа. Распределение остаточного отклонения $\delta P_{\text{КВД}}$ по критерию χ^2 полагается нормальным с доверительной вероятностью не менее 0,95 – рис. 6.

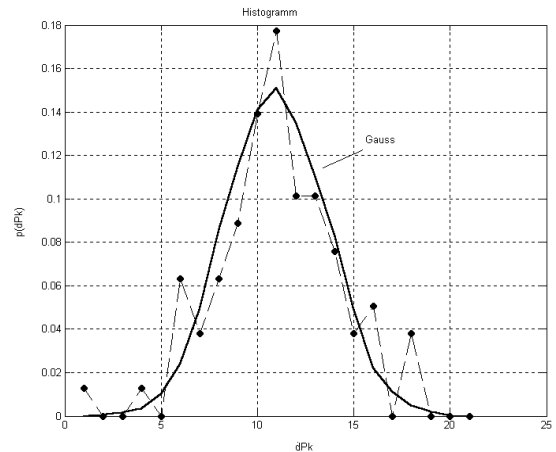


Рис. 6. Распределение остаточного отклонения

Полученные результаты имеют объяснимую физическую трактовку, поскольку коэффициент взаимокорреляции между первой главной компонентой и T_{ex} превышает 0,85, следовательно МФА позволяет учесть влияние именно этого фактора на разброс данных регистрации.

Следовательно, применение МФА позволяет существенно повысить надежность диагностики состояния ГТД, учесть влияние изменяющихся условий эксплуатации. Отображение данных регистрации в плоскости первых двух факторов позволяет выделить группы аномальных отклонений и тем самым идентифицировать состояние объекта [9]. Вычислительная сложность алгоритмов МГК и

МФА в настоящее время не является препятствием для их использования в АСД. Однако необходимо учитывать тот факт, что такие алгоритмы требуют достаточно представительных выборок ($m > 80$) для получения доверительной вероятности порядка 0,95 [6] и объема параметров ($n > 5$) для корректного решения задач МФА [9].

Заключение

Решение задачи повышения достоверности оценки технического состояния сложных объектов, в частности, газотурбинных двигателей в составе ГТП, может быть достигнуто путем совершенствования применяемых методик диагностирования, в которых необходимо учитывать диагностические модели ГТД, полученные по данным стендовых испытаний и в процессе эксплуатации, а также современные методы прикладной статистики – методы главных компонент и факторного анализа. Технические средства АСД позволяют в настоящее время использовать более совершенное алгоритмичное и программное обеспечение. Актуальным вопросом является отработка соответствующих методик на экспериментальных данных и создание прикладного ПО, что и определяет перспективы дальнейших исследований.

Литература

1. Эксплуатация автоматизированных систем диагностирования АСД-36СТ и АСД-38СТ газотурбинных приводов НК-36СТ и НК-38СТ на компрессорных станциях / В.Б. Коротков, Ю.К. Кривоуцкий, В.Н. Михнович и др. // *Авиационно-космическая техника и технология*. – 2003. – № 7 (42). – С. 105-107.
2. Коротков В.Б., Кривоуцкий Ю.К., Михнович В.Н., Тарасенко Ю.Н. Автоматизированные системы диагностирования газотурбинных двигателей НК-36СТ и НК-38СТ // *Авиационно-космическая техника и технология*. – 2001. – Вып. 26. – С.219-221.
3. Бочкарев С.Г., Мосоулин В.В. Автоматизиро-

ванная система контроля и прогнозирования технического состояния привода газоперекачивающих агрегатов НК-14СТ // *Авиационно-космическая техника и технология*. – Х.: Нац. аэрокосм. ун-т «ХАИ», 2002. – Вып. 71. – С. 195-196.

4. Опыт эксплуатации автоматизированных систем диагностирования газотурбинных приводов семейства НК на газоперекачивающих станциях / В.Б. Коротков, В.Н. Михнович, В.А. Оболенский и др. // *Вестник двигателестроения*. – 2004. – № 2. – С. 165-168.

5. Елисеев Ю.С., Добрянский Г. В., Дема Т.Ф. Статистические методы формирования алгоритмов вычисления в полете тяги и других основных параметров газотурбинного двигателя, критериев и признаков технического состояния его узлов // *Авиационно-космическая техника и технология*. – Х.: Нац. аэрокосм. ун-т «ХАИ», 2003. – Вып. 6 (41). – С. 81-89.

6. Новицкий П.В., Зограф И.А. Оценка погрешностей результатов измерений. – Л.: Энергоатомиздат, 1985. – 248 с.

7. Егоров И.В. Диагностирование технического состояния авиационных двигателей // *Труды ЦИАМ «Научный вклад в создание авиационных двигателей»*. – М.: Машиностроение. – 2000. – С. 651-688.

8. Марпл мл. С.Л. Цифровой спектральный анализ и его приложения. – М.: Мир, 1990. – 584 с.

9. Айвазян С.А., Бухштабер В.М., Енюков И.С., Мешалкин Л.Д. Прикладная статистика. Классификация и снижение размерности. – М.: Финансы и статистика, 1989. – 607 с.

Поступила в редакцию 6.03.2006

Рецензент: д-р техн. наук, проф. С.А. Нестеренко, Одесский национальный политехнический университет, Одесса.