

УДК 681.518.54

В.Ф. МИРГОРОД¹, Н.Д. БАГАУТДИНОВ²¹ОАО «Элемент», Одесса, Украина²ГП ЗМКБ «Ивченко-Прогресс», Запорожье, Украина

ДВУМЕРНАЯ ФОРМА СИНГУЛЯРНОГО АНАЛИЗА ВРЕМЕННЫХ РЯДОВ ПАРАМЕТРОВ РЕГИСТРАЦИИ ГАЗОТУРБИННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

Выполнена разработка и приведены результаты применения метода двумерного сингулярного трендового анализа применительно к задаче диагностирования технического состояния газотурбинного двигателя в длительной эксплуатации. Предлагаемый новый метод основан построении диагностической модели в виде регрессионной полиномиальной аппроксимации взаимозависимостей приведенных термогазодинамических параметров ГТД, определении отклонений от указанной модели, формировании по временным рядам таких отклонений прямоугольной комплексной траекторной матрицы и ее сингулярном разложении по собственным числам.

Ключевые слова: техническая диагностика, регрессионная модель, методы трендового и сингулярного анализа.

Введение

Эксплуатация газотурбинных двигателей (ГТД) по техническому состоянию требует разработки теоретических, методологических, алгоритмических и программно-аппаратных средств оценки такого состояния ГТД в его жизненном цикле. Необходимой составной частью таких средств является подсистема трендового контроля и анализа, позволяющая выявить возникновение изменений в состоянии ГТД по термогазодинамическим и вибропараметрам и оценить характер таких изменений. Проблемным вопросом усовершенствования методов трендового контроля и анализа, важным для решения научно-практических задач повышения достоверности диагностических выводов, является оценка совместной динамики трендов различных взаимосвязанных параметров ГТД.

1. Постановка проблемы и цель исследования

Известные статистики тренда применительно к задачам диагностики технического состояния ГТД обобщены в [1]. Эффективность таких статистик подтверждена их успешным применением в ряде реализованных диагностических систем. Вопросам анализа и выделения трендов параметров ГТД в эксплуатации посвящены работы [2, 3]. Следуя [4] и [5], окончательное решение по диагностической ситуации рекомендуется принимать по диаграмме совместных трендов. Следовательно, возникает необходимость рассмотрения совместных трендов различных параметров ГТД и приме-

нения методов многомерного, в общем случае, трендового анализа.

Целью настоящего исследования является разработка и обоснование двумерного трендового анализа временных рядов, которые являются параметрами регистрации технического состояния ГТД в его жизненном цикле.

2. Основные результаты исследований

2.1. Объект исследования и метод диагностирования

Объектом исследования являются базы данных регистрации основных термогазодинамических и вибропараметров ряда ГТД в составе авиационных силовых установок и газоперекачивающих агрегатов.

Применяемый метод диагностирования состоит из последовательно реализуемых следующих этапов:

- приведение термогазодинамических параметров ГТД к стандартным атмосферным условиям,
- построение индивидуальных диагностических моделей ГТД по данным стендовых испытаний и эксплуатации в виде нелинейных регрессионных зависимостей,
- выделение трендов отклонений с учетом диагностических моделей, а также трендов вибропараметров,
- факторный анализ трендов отклонений,
- сингулярный трендовый анализ отклонений от диагностических моделей,
- оценка характера остаточных отклонений после выделения трендов.

Существенными особенностями предлагаемой методики являются следующие отличия:

– нелинейная регрессионная диагностическая модель ГТД является индивидуализированной применительно к конкретному экземпляру двигателя,

– проводится углубленный трендовый анализ применительно к отклонениям параметров ГТД в процессе его эксплуатации от индивидуальной диагностической модели,

– применяется совокупность разработанных методов трендового анализа высокой эффективности, в частности, многомерного анализа, позволяющая разделить исследуемые временные ряды на взаимосвязанные трендовые, периодические и стохастические компоненты.

2.2. Диагностирование газотурбинного двигателя по регрессионной модели с применением методов факторного анализа

Исходными данными являются базы данных регистрации внутривысочных термогазодинамических параметров, частности, $N_{ВД}$, $N_{НД}$, $P_{КВД}$, $T_{ТНД}^*$, $P_{ВХ}$, $T_{ВХ}^*$

Методика диагностирования двигателя заключается в приведении параметров к стандартным атмосферным условиям (с.а.у.) согласно известным формулам:

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

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

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

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

с последующим приведением параметров к базовому режиму:

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

$$\begin{cases} N_{НДпрк} = N_{НДпр} - F_{НД} \cdot \Delta N_{ВДпр}; \\ P_{КВДпрк} = P_{КВДпр} - F_{р} \cdot \Delta N_{ВДпр}; \\ T_{ТНДпрк}^* = T_{ТНДпр}^* - F_{Т} \cdot \Delta N_{ВДпр} \end{cases} \quad (6)$$

и вычислением отклонений от этого режима

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

Принципиальным моментом методики является тот факт, что формулах (6) функции зависимостей характеристик ГТД от режимного параметра и параметры в (7) индивидуализированы применительно к конкретному экземпляру двигателя. Эти данные

должны быть получены по данным стендовых испытаний и уточнены в процессе эксплуатации двигателя путем нелинейной полиномиальной регрессионной аппроксимации.

Анализ и контроль подлежат тренды отклонений (7) для $N_{НД}$, $P_{КВД}$ и $T_{ТНД}$. Как результат применения диагностической модели должны быть получены временные ряды отклонений, причем, как известно, использование диагностических моделей существенно уменьшает разброс данных [5, 6] и уменьшить дисперсию остаточных отклонений, что повышает надежность диагностических выводов. 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 методе наименьших квадратов, имеют высокую чувствительность к нецензурированным выбросам в исходных данных и требуют их предварительной обработки.

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 факторного анализа (МФА).

Параметры регистрации образуют вектор

$$x^{(m)} = \text{col} \left(N_{ВДпр}, P_{КВДпр}, N_{НДпр}, T_{ТНДпр}^*, P_{ВХ}, T_{ВХ}^* \right), \quad (8)$$

а их совокупность – матрицу наблюдений X .

Строки этой матрицы можно полагать признаками объекта, а столбцы – его состояниями. Сингулярное разложение $m \times n$ матрицы наблюдений имеет вид [6]

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

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 методу факторного анализа, выполняется следующее представление матрицы наблюдений

$$X = BF + N,$$

где F – матрица центрированных, независимых и нормированных факторных компонент [6],

B – матрица факторных нагрузок,

N – вектор остаточных несущественных факторов.

Прямое определение матрицы F согласно (9) для каждого σ_1 приводит к главным компонентам матрицы наблюдений. Сущность метода факторного анализа 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 [6]. Следующий общий фактор находится из условия максимального ослабления попарных корреляционных связей между исходными признаками, оставшимися после учета влияния первого общего фактора.

Результат применения указанной процедуры метода факторного анализа к матрице наблюдений, составленной из приведенных согласно (1)...(6) параметров ГТД после учета первых факторов, имеющих наибольшие дисперсии, дает существенное уменьшение остаточной дисперсии. Фактически применение метода факторного анализа позволяет усовершенствовать формулы приведения с учетом реальных особенностей конкретного двигателя и условий эксплуатации. В частности, характерной особенностью диагностирования наземных силовых установок является наличие в данных регистрации циклических компонент, соответствующих изменениям атмосферных условий и сезонным изменениям. Следовательно, применение метода факторного анализа 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 [6].

2.3. Диагностирование авиационной силовой установки по данным летной регистрации

Следующим этапом решения задачи диагностирования является выделения трендов отклонений от регрессионных моделей, для решения которой используется метод сингулярного спектрального анализа [5] SSA (Singular Spectrum Analysis), основанный на анализе сингулярного спектра траекторной матрицы

$$Y = \begin{bmatrix} y_1 y_2 \dots y_k \\ y_2 y_3 \dots y_{k+1} \\ \dots \\ y_m y_{m+1} \dots y_n \end{bmatrix} = [Y_1, Y_2, \dots, Y_k], \quad (10)$$

где m – длина окна;

n – число членов ряда, $k = n - m$.

Указанное разложение траекторной матрицы (9) позволяет упорядочить ее структуру по собственным числам

$$Y = \sum_{i=1}^S \sqrt{\lambda_i} U_i V_i^T, \quad (11)$$

где $\lambda_1 \geq \lambda_2 \geq \dots \geq \lambda_S$ – собственные числа матрицы $A = YY^T$, U_i, V_i – собственные и факторные векторы.

На этапе восстановления ряд представляется в виде

$$Y = Y_{\text{trend}} + Y_{\text{cicle}} + Y_{\text{noise}},$$

то есть разложения на трендовую, периодические (циклические) составляющие и шум.

Идея двумерного трендового сингулярного анализа состоит в представлении траекторной матрицы (10) в виде матрицы комплекснозначных отсчетов, в которой объединяются исследуемые различные параметры ГТД, представленные отклонениями от диагностической модели

$$y_i = x_i + jz_i$$

Соответственно, в разложении (11) собственные числа относятся к матрице

$$B = YY^H = (X + jZ)(X - jZ)^T = (XX^T + ZZ^T) + j(X^T Z + XZ^T). \quad (12)$$

Получаемый согласно (11) тренд также является комплекснозначным, причем, следуя (12), его вещественная часть характеризует тренд различия между изменениями параметров, а его мнимая часть характеризует тренд взаимосвязи объединяемых параметров. Действительно, нетрудно показать, что общий член матрицы $A = YY^T$ имеет вид

$$a_{ij} = \sum_{k=1}^n y_{k+j-1} y_{k+i-1}$$

Поэтому ее диагональ представляет собой скользящую дисперсию выборки, а любая строка есть сечения функции автокорреляции. Учитывая известное неравенство

$$\lambda_{\max} \leq \text{Sp}(A),$$

а также упорядоченность собственных значений по их величине согласно алгоритму SSA, трендовая компонента, если она имеется, связывается с максимальным собственным значением матрицы A , а значит, с изменением скользящей дисперсии. Здесь имеет место тесная взаимосвязь с предложенным И.В. Егоровым Ф-критерием тренда, основанным на изменении выборочной дисперсии выборки. Согласно (12), если тренд вещественной компоненты в объединенной выборке не является статистически значимым, то и различие трендов анализируемых параметров также таковым не является. Различие характеров трендов по различным параметрам ГТД может быть важным диагностическим признаком его состояния. Если же согласно (12) тренд мнимой компоненты не является статистически значимым,

то можно полагать, что тренды параметров не являются взаимосвязанными.

Оценка эффективности предлагаемого подхода выполнено на примере задачи определения технического состояния двухвального газотурбинного двигателя в составе авиационной силовой установки в процессе летной эксплуатации. Наиболее представительные выборки содержат около 30 параметров летной регистрации, включая основные термогазодинамические параметры, обороты турбин и вибропараметры, для 350 полетных циклов в трех режимах: взлетный, крейсерский и 0,5 номинала. Результаты применения ранее предложенного метода диагностирования иллюстрирует рис. 1, на котором представлены тренды отклонений от диагностической модели для отклонений оборотов турбины низкого давления и степени повышения давления.

На рис. 1 дополнительно обозначены реперные даты и номера полетных циклов, причем последняя точка соответствует аварийной ситуации.

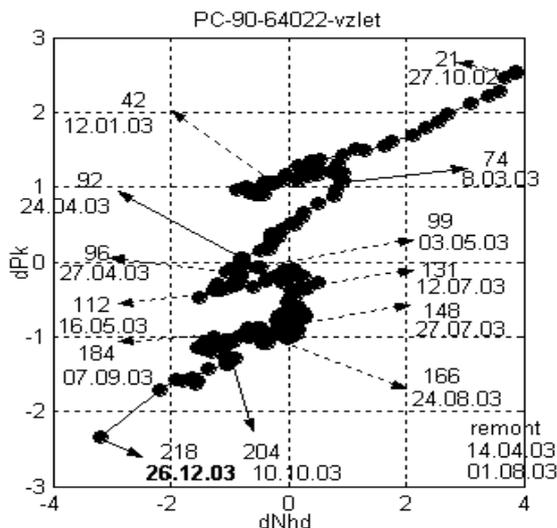


Рис. 1. Тренд отклонения

На рис. 2 представлены результаты двумерного трендового анализа в плоскостях первых главных компонент, соответствующих максимальным собственным числам и трендам отклонений. Главные компоненты получены путем решения задачи на собственные значения и собственные вектора для комплексной матрицы $B = YY^H$, составленной путем комплексного объединения отклонений по параметрам ГТД в различных комбинациях. Целью анализа является выявление связанных трендов отклонений. Критерием такой связанности является близость линии регрессии на комплексной плоскости главных компонент к биссектрисе первого квадранта, так как при идентичности трендов такая линия вырождается в указанную прямую. Поэтому чем

больше статистическая связь между трендами различных параметров, тем ближе линия регрессии в плоскости главных компонент приближается к биссектрисе.

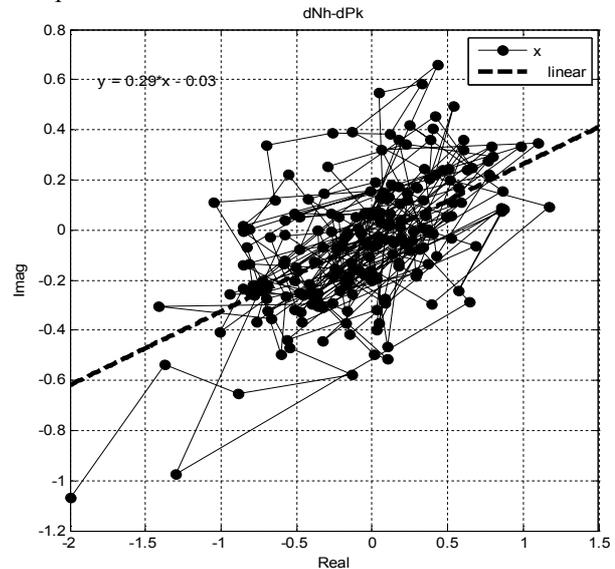


Рис. 2. Плоскость главных компонент

Проведенный анализ позволил установить, что внутриваловые параметры для иллюстрируемого примера разбиваются на две группы статистически связанных по трендам отклонений, а именно: обороты турбины низкого давления – степень повышения давления, температура газов – расход топлива. Иные статистические связи между трендами не являются значимыми. Поэтому имеется возможность разделить пространство признаков при решении диагностических задач на два кластера по указанным двумерным трендам, что может обеспечить повышение надежности статистических выводов о техническом состоянии диагностируемого двигателя.

Заключение

Таким образом, применение методов трендового анализа в многомерной форме позволяет уменьшить степень априорной неопределенности относительно компонент признакового пространства при решении задач оценки технического состояния газотурбинных двигателей в составе авиационных и наземных силовых установок путем предварительной его кластеризации по группам взаимосвязанных трендов. Актуальным вопросом является отработка соответствующих методик на экспериментальных данных достаточного объема и создание прикладного ПО, что и определяет перспективы дальнейших исследований.

Литература

1. Синтез систем управления и диагностирования газотурбинных двигателей / С.В. Епифанов, В.И. Кузнецов, И.И. Богаенко и др. – К.: Техника, 1998. – 312 с.
2. Елисеев Ю.С. Статистические методы формирования алгоритмов вычисления в полете тяги и других основных параметров газотурбинного двигателя, критериев и признаков технического состояния его узлов / Ю.С. Елисеев, Г.В. Добрянский, Т.Ф. Дема // *Авиационно-космическая техника и технология*. – 2003. – № 6 (41). – С. 81-89.
3. Миргород В.Ф. Сравнительный анализ методов диагностирования технического состояния двигателя газотурбинного привода по данным регистрации / В.Ф. Миргород, Г.С. Ранченко // *Авиационно-космическая техника и технология*. – 2006. – №2 (28). – С. 70-74.
4. Егоров И.В. Диагностирование технического состояния авиационных двигателей / И.В. Егоров // *Труды ЦИАМ «Научный вклад в создание авиационных двигателей»*. – М.: Машиностроение, 2000. – С. 651-688.
5. Миргород В.Ф. Применение диагностических моделей и методов трендового анализа для оценки технического состояния газотурбинных двигателей / В.Ф. Миргород, Г.С. Ранченко, В.М. Кравченко // *Авиационно-космическая техника и технология*. – 2008. – № 9 (56) – С. 192-197.
6. Прикладная статистика. Классификация и снижение размерности / С.А. Айвазян, В.М. Бухштабер, И.С. Енюков, Л.Д. Мешалкин. – М.: Финансы и статистика, 1989. – 607 с.

Поступила в редакцию 1.06.2010

Рецензент: д-р техн. наук, проф. С.Г. Антошук, Одесский национальный политехнический университет, Одесса, Украина.

ДВОМІРНА ФОРМА СИНГУЛЯРНОГО АНАЛІЗУ ЧАСОВИХ РЯДІВ ПАРАМЕТРІВ РЕЄСТРАЦІЇ ГАЗОТУРБІННИХ ДВИГУНІВ

В.Ф. Миргород, Н.Д. Багаутдінов

Виконано розробку та наведено результати застосування методу двомірного сингулярного трендового аналізу стосовно задачі діагностування технічного стану газотурбінного двигуна у тривалій експлуатації. Пропонований новий метод ґрунтується на побудові діагностичної моделі двигуна у вигляді регресійної поліноміальної апроксимації взаємозалежностей приведених термогазодинамічних параметрів ГТД, визначені відхилень від вказаної моделі, формуванні по часовим рядам таких відхилень прямокутної комплексної траєкторної матриці та її сингулярному розкладанні по власним числам.

Ключові слова: технічна діагностика, регресійна модель, методи трендового і сингулярного аналізу.

TWO-DIMENSIONAL FORM OF SINGULAR ANALYSIS OF TEMPORAL ROWS OF TURBO-ENGINES REGISTRATION PARAMETERS

V.F. Mirgorod, N.D. Bagautdinov

Development is executed and the results of application of method of two-dimensional singular trend analysis are resulted as it applies to the task of diagnosticating of the technical state of gas turbine engine in the protracted exploitation. The offered new method is founded construction of diagnostic model as regressive polynomial approximation of dependencies of the resulted thermogas dynamic parameters of GTE, determination of deviations from the indicated model, forming on temporal rows such.

Key words: technical diagnostics, regressive model, methods of trend and singular analysis.

Миргород Владимир Федорович – канд. техн. наук, заместитель директора по научной работе ОАО "Элемент", Одесса, Украина, e-mail:odessa@element.od.ua.

Багаутдинов Наиль Дахиевич – ведущий конструктор ГП ЗМКБ "Ивченко-Прогресс", Запорожье, Украина, e-mail:03509@ivchenko-progress.com.