

УДК 004.942 : 629.4.001.4

В. Ф. МИРГОРОД, И. М. ГВОЗДЕВА, В. М. ГРУДИНКИН*АО «Элемент», Одесса, Украина*

ИНТЕРВАЛЬНЫЙ ТРЕНДОВЫЙ АНАЛИЗ ВРЕМЕННЫХ РЯДОВ ДАННЫХ РЕГИСТРАЦИИ СИЛОВЫХ И ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВОК НАЗЕМНОГО ПРИМЕНЕНИЯ

Рассмотрены особенности диагностики технического состояния газотурбинных двигателей силовых установок наземного применения. Предложен подход к получению обоснованных статистических выводов о техническом состоянии на основе выделения трендов отклонений от диагностической модели и последующей их интервальной оценки на заданном уровне доверительной вероятности. Выполнено сопоставление стандартной методики диагностирования и предлагаемой, статистически обоснованной, на примере ГТД газоперекачивающего агрегата. Установлен факт высокой корреляционной связи приведенных параметров ГТД с внешними температурными условиями, для парирования которой предлагается использовать методы факторного анализа. Разработано программно-алгоритмическое обеспечение для реализации предлагаемого подхода.

Ключевые слова: газотурбинный двигатель, диагностики, диагностическая модель, трендовый анализ, интервальная оценка

Введение

Проблема перевода силовых и энергетических установок (СиЭУ) с газотурбинными двигателями (ГТД), как авиационного, так и наземного общепромышленного применения, на стратегию эксплуатации по техническому состоянию еще далека от своего решения. Достижение указанной цели требует решения ряда как организационных, так и научно-практических задач. К числу первых относится консолидация основных отечественных разработчиков и производителей СиЭУ и комплектующих (ЗМКБ “Ивченко-Прогресс”, АО “Мотор Сич”, НПО им. Фрунзе, ГНПП “Зоря-Машпроект”, АО “Элемент”), с целью выработки основных принципов концепции перехода на эксплуатацию по техническому состоянию, с указанием реальных целей, достижимых результатов и сроков их исполнения, с учетом располагаемых ресурсов.

Научно-практическая задача состоит в отработке необходимого теоретического, методологического и алгоритмического обеспечения для создания инструментальных технических средств текущего контроля, оценки и прогноза технического состояния СиЭУ различного назначения.

1. Формулирование проблемы

При наличии широкого спектра создаваемых отечественных СиЭУ следует отметить существенные различия по их функциональному назначению,

что, в свою очередь, диктует необходимость применения различных методик оценки технического состояния силовых установок (СУ) авиационного назначения и СиЭУ наземного применения

Для авиационных СУ характерно существенное различие внешних условий в последовательных полетных циклах, многообразие режимов в пределах полетного цикла, временная неравномерность данных регистрации термогазодинамических (ТГП) и вибропараметров. Последнее обстоятельство ставит под сомнение отнесение данных регистрации к собственно временным рядам в том смысле, как они понимаются в прикладной статистике. Имеет место также существенное различие в режимах авиационных СУ различного назначения (маршевые ТРДД и турбовальные ТвАД). Для СиЭУ наземного применения (турбовального типа) характерно относительное постоянство номинальных режимов, периодичность срезов данных регистрации ТГП и ВП. Однако имеют место существенные различия в режимах функционирования СУ различного назначения (ГПА и ГТЭ) ввиду характера изменения нагрузки.

Общим недостатком применяемых в системах контроля и диагностики (СКД) методов трендового контроля и анализа технического состояния СУ является неопределенность статистической значимости предлагаемых выводов о техническом состоянии диагностируемых объектов.

Целью настоящего исследования является интервальная оценка трендов временных рядов параметров регистрации термогазодинамических пара-

метров СиЭУ наземного применения в длительной эксплуатации на заданном уровне статистической значимости.

2. Решение проблемы

Для оценки технического состояния СУ в настоящее время предложено ряд методов трендового контроля и анализа [1,2,3]. Известные и применяемые методы трендового контроля, основанные на статистиках кумулятивных сумм, Хальда-Аббе, Фишера и других, позволяют установить лишь факт изменения параметра положения временного ряда на заданном уровне значимости и, предположительно, изменения технического состояния СУ. Указанные методы не дают возможность выполнить оценку тренда и причины его возникновения. Предлагаемые современные методы трендового анализа, основанные на ортогональном разложении Карунена-Лоева, а именно: метод главных компонент (МГК), сингулярного спектрального анализа (SSA), “гусеница”, “caterpillar”, и другие, не позволяют установить статистическую значимость диагностических выводов [4].

Разрешением указанного противоречия является предложенный в [3] комплекс методов многомерного трендового анализа, позволяющий установить интервальные оценки многомерных трендов на заданном уровне статистической значимости и решить задачу прогноза.

Предложенные в [3] методы базируются на исходной гипотезе, что после извлечения из временного ряда трендовой компоненты остаточный временной ряд удовлетворяет предположению о принадлежности к выборке из генеральной совокупности некоррелированных независимых случайных величин (СВ) с нормальным распределением:

$$\bar{\chi}_k \in N(m, \sigma),$$

где $\bar{\chi}_k$ – временной ряд,

m, σ – моменты первого и второго порядков.

Эта гипотеза проверяется по критериям χ^2 и Колмогорова-Смирнова. Если среднеквадратическое отклонение (СКО) остаточных отклонений находится в пределах точности измерительных каналов (ИК) соответствующих параметров (оборотов турбин, параметров давления, температуры и других), то такое разделение правомерно.

Применяемая методика диагностирования состоит из последовательно реализуемых следующих этапов:

- приведение термогазодинамических параметров ГТД к стандартным атмосферным условиям,

- построение диагностических моделей ГТД в виде нелинейных регрессионных зависимостей,
- выделение трендов отклонений с учетом диагностических моделей.

Существенными особенностями предлагаемой методики являются следующие отличия:

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

- проводится не только трендовый контроль, но и углубленный трендовый анализ применительно к отклонениям параметров ГТД в процессе его эксплуатации от индивидуальной диагностической модели,

- применяется совокупность методов многомерного трендового анализа высокой эффективности, позволяющая разделить исследуемый временной ряд на трендовую, периодические и стохастическую компоненты.

Для реализации рассматриваемой методики применительно к конкретным задачам диагностирования разработано необходимое алгоритмическое и программное обеспечение.

Результативность и эффективность применяемой методики подтверждена успешным решением ряда прикладных задач диагностирования ГТД в составе авиационных силовых установок и газоперекачивающих агрегатов.

Одной из первых задач диагностирования, для которой последовательно реализованы практически все необходимые этапы методики, является задача оценки технического состояния газотурбинного двигателя Д-336 в составе ГТП №336-1-01 в процессе нормальной эксплуатации длительностью ~18 мес. с наработкой 5650 часов [2].

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

Типовая методика диагностирования согласно РЭ разработчика двигателя заключается в приведении параметров к стандартным атмосферным условиям (с.а.у.) согласно известным формулам

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

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

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

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

с последующим приведением параметров к базовому режиму

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

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

и вычислением отклонений от этого режима

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

Весьма важным положительным моментом РЭ является тот факт, что формулах (6) коэффициенты крутизны характеристик ГТД и формулярные параметры в (7) индивидуализированы применительно к конкретному экземпляру двигателя. Однако эти данные получены на этапе непродолжительных стендовых испытаний, в то время как в процессе эксплуатации двигателя имеется участок приработки, то есть установления параметров. Контролю подлежит нахождение отклонений (7) в заданных допусках для $N_{\text{НД}}$, $P_{\text{КВД}}$ и $T_{\text{ТНД}}$.

Несовершенство типовой модели (1)...(7) согласно РЭ заключается в весьма приближенном учете хода дроссельных характеристик реального двигателя, путем их линейной аппроксимации согласно (6), справедливой только при малых отклонениях. Однако это условие не соблюдается для исследуемых БД регистрации.

Реально реализуемая зависимость

$$P_{\text{КВДпрк}} - P_{\text{КВДпр}} = f_{\text{р}}(\Delta N_{\text{ВДпр}}) \quad (8)$$

имеет, во-первых, существенно нелинейный характер функции (8), и, во-вторых, серию аномальных отклонений от этой зависимости. После исключения указанных аномальных отклонений согласно [2] построена полиномиальная регрессионная модель (8) на основе МНК. Аналогичные модели построены по БД для параметров $N_{\text{НД}}$ и $T_{\text{ТНД}}$. После замены в (6) постоянных коэффициентов нелинейными функциями получены временные ряды отклонений, трендовый анализ которых выполнен согласно [3].

Использование диагностической регрессионной нелинейной модели позволяет существенно уменьшить дисперсию остаточных отклонений и тем самым повысить надежность результатов диагностики. Дальнейшее уменьшение дисперсии остаточных отклонений и идентификация состояния объекта за счет исключения не связанных с его состоянием факторов достигнуто на основе применения к выборке параметров регистрации метода интервальной оценки трендовой компоненты на заданном уровне статистической значимости [3].

Результаты проведенных исследований представлены на рис. 1 – рис. 4. Интервальная оценка

выполнена на уровне доверительной вероятности 0,95 с окном в 20 отсчетов.

На рис. 1 и рис. 2 представлены результаты интервальной оценки трендов отклонений от модели согласно РЭ (6).

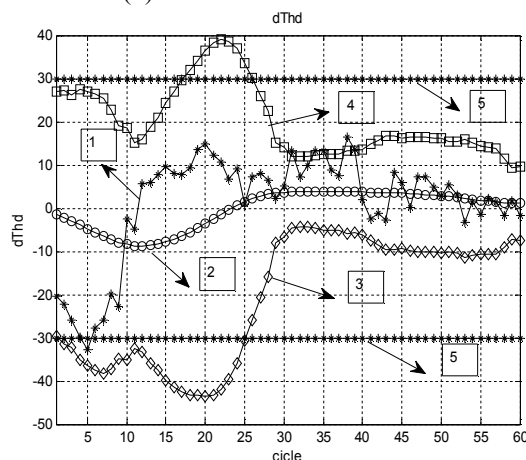


Рис. 1. Результаты обработки временного ряда температуры согласно РЭ:

- 1 – выборка отклонений; 2 – тренд выборки; 3, 4 – доверительные интервалы; 5 – заданные РЭ границы

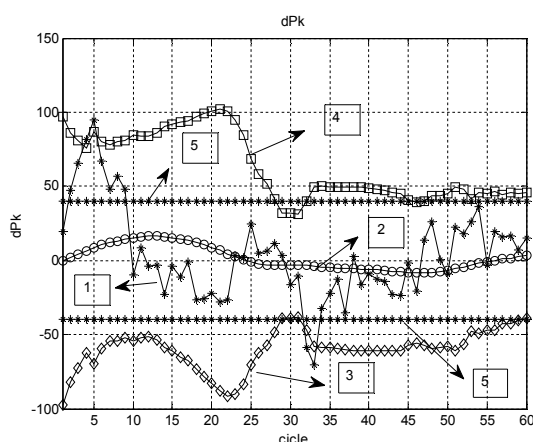


Рис. 2. Результаты обработки временного ряда давления согласно РЭ:

- 1 – выборка отклонений; 2 – тренд выборки; 3, 4 – доверительные интервалы; 5 – заданные РЭ границы

Как это следует из приведенных иллюстраций, на заданном уровне доверительной вероятности нельзя утверждать, что выборочная оценка тренда находится внутри коридоров, установленных РЭ.

На рис. 3 и рис. 4 представлены результаты интервальной оценки трендов отклонений от модели согласно РЭ (8). За счет более совершенной ДМ достигнут позитивный результат, который позволяет сформулировать корректный статистический вывод: на заданном уровне доверительной вероятности следует отбросить гипотезу, что выборочная оценка

тренда выйдет за пределы коридоров, установленных РЭ.

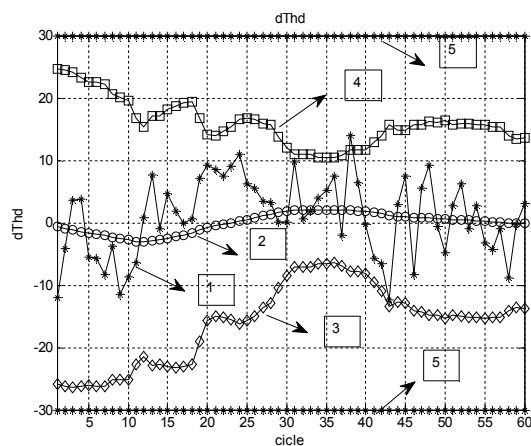


Рис. 3. Результаты обработки временного ряда температуры согласно ДМ:
1 – выборка отклонений; 2 – тренд выборки;
3, 4 – доверительные интервалы;
5 – заданные РЭ границы

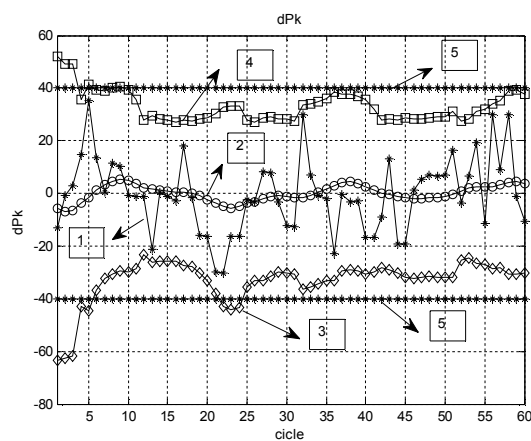


Рис. 4. Результаты обработки временного ряда давления согласно ДМ:
1 – выборка отклонений; 2 – тренд выборки;
3, 4 – доверительные интервалы;
5 – заданные РЭ границы

Весьма важным отличием полученных результатов от диагностирования авиационных СУ, является высокий уровень взаимокорреляции приведенных параметров от температуры на входе, который достигает 0,7-0,8 для оборотов турбин и температуры газов. Таким образом, формулы приведения для наземных СУ не являются достаточно совершенными. Полагается более перспективным использовать методы факторного анализа, поскольку они позволяют исключить такие компоненты, которые имеют наибольшую корреляционную связь с внешними условиями.

Заключение

В настоящее время имеются необходимые предпосылки, методическое, алгоритмическое и программное обеспечение, для решения задачи повышения достоверности оценки технического состояния газотурбинных двигателей в составе авиационных и наземных силовых установок, Указанная цель может быть достигнута 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 трендового анализа.

Сочетание методов построения адекватных диагностических моделей, методов выделения трендовой компоненты отклонений от таких моделей и вероятностной оценки ее доверительных интервалов позволяет повысить надежность диагностических выводов о техническом состоянии СиЭУ на базе ГТД.

Литература

1. Синтез систем управления и диагностирования газотурбинных двигателей [Текст] / С. В. Епифанов, Б. И. Кузнецов, И. И. Богаенко [и др.]. – К. : Техніка, 1998. – 312 с.
2. Миргород, В. Ф. Применение диагностических моделей и методов трендового анализа для оценки технического состояния газотурбинных двигателей [Текст] / В. Ф. Миргород, Г. С. Ранченко, В. М. Кравченко // *Авіаційно-космічна техніка і технологія*. – 2008. – № 9(56). – С. 192-197.
3. Миргород, В. Ф. Оценка доверительных интервалов трендовой компоненты временных рядов [Текст] / В. Ф. Миргород, Е. В. Деренг // *Авіаційно-космічна техніка і технологія*. – 2014. – № 7(114). – С. 175-180
4. Главные компоненты временных рядов : метод "Гусеница" [Текст] ; под ред. Д. Л. Данилова, А. А. Жиглявского. – Санкт.-П. ун-т. – 1997. – 280 с.

References

1. Epifanov, S. V., Kuznecov, B. I., Bogaenko, I. I. *Sintez sistem upravlenija i diagnostirovanija gazoturbinnih dvigatelej* [Synthesis of control system and diagnosticating of gas turbo-engines]. Kiev, Technique Publ., 1998. 312 p.
2. Mirgorod, V. F., Ranченко, G. S., Kravchenko, V. M., *Primenenie diagnosticheskikh modelej i metodov trendovogo analiza dlja ocenki tehničeskogo sostojanija gazoturbinnih dvigatelej* [Diagnostic model and trend analyze application for gas turbine technical state assessment]. *Aerospace technic and technology*, 2008, no. 9 (56), pp. 192-197.

3. Mirgorod, V. F., Dereng, E. V. Ocenka doveritel'nyh intervalov trendovoy komponenty vremennyh rjadov [Assessment of confidence interval of time series trend component]. *Aerospace technic and technology*, 2014, no. 7 (114), pp. 175-180.

4. Danilova, D. L., Zhigljavskogo, A. A. *Glavnye komponenty vremennyh rjadov : metod "Gusenica"* [Main components of time series : method "Gusenitsa"]. Saint-Petersburg university Publ., 1997. 280 p.

Поступила в редакцію 3.06.2016, рассмотрена на редколлегии 16.06.2016

Рецензент: д-р техн. наук, проф. Б. А. Демянчук, Военная академия, Одесса, Украина

ІНТЕРВАЛЬНИЙ ТРЕНДОВИЙ АНАЛІЗ ЧАСОВИХ РЯДІВ ДАНИХ РЕЄСТРАЦІЇ СИЛОВИХ ТА ЕНЕРГЕТИЧНИХ УСТАНОВОК НАЗЕМНОГО ЗАСТОСУВАННЯ

В. Ф. Миргород, І. М. Гвоздева, В. М. Грудинкин

Розглянуті особливості діагностування технічного стану газотурбінних двигунів силових установок наземного застосування. Запропоновано підхід до отримання обґрунтованих статистичних висновків про технічний стан на основі виділення трендів відхилень від діагностичної моделі і наступної їх інтервальної оцінки на заданому рівні довірчої ймовірності. Виконано співставлення стандартної методики діагностування і пропонованої, статистично обґрунтованої, на прикладі ГТД газоперекачуючого агрегату. Встановлено факт високого кореляційного зв'язку приведених параметрів ГТД із зовнішніми температурними умовами, для парювання якого пропонується використання методів факторного аналізу. Розроблено програмно-алгоритмічне забезпечення для реалізації пропонованого підходу

Ключові слова: газотурбінний двигун, діагностики, діагностична модель, трендовий аналіз, інтервальна оцінка

INTERVAL TREND ANALYSIS OF TEMPORAL ROWS OF DATA OF REGISTRATION OF POWER AND POWER OPTIONS OF SURFACE APPLICATION

V. F. Mirgorod, I. M. Gvozdeva, V. M. Grudinkin

Technical state singularity for gas turbine engine of ground application propulsion is examined. Approach to reception of founded statistics conclusions about technical state on the base of trend deflection separation from diagnostic model and following interval assessment on defined level of confidence probability is proposed. Comparison of standard methodology of diagnosing and offered, statistically reasonable methodology by the example of gas-compressor unit GTE is executed. Fact of high cross-correlation association of the GTE resulted parameters with external temperature conditions (for parry of this association it is suggested to use the methods of factor analysis) is determined. Software support for realization offered approach is worked out.

Key words: gas turbine engine, diagnostic, diagnostic model, trend analyze, interval assessment.

Миргород Владимир Федорович – д-р техн. наук, вед. науч. сотр. АО «Элемент», Одесса, Украина, e-mail: mirgorod_v@mail.ru.

Гвоздева Ирина Муратовна – д-р техн. наук, вед. науч. сотр. АО «Элемент», Одесса, Украина, e-mail: odessa@element.od.ua.

Грудинкин Вячеслав Михайлович – зам. главного конструктора АО «Элемент», Одесса, Украина, e-mail: odessa@element.od.ua.

Mirgorog Vladimir Fedorovich – Doctor of Sciences, Senior Researcher, JSC ELEMENT, Odessa, Ukraine, e-mail: mirgorod_v@mail.ru.

Gvozdeva Irina Muratovna – Doctor of Sciences, Senior Researcher, JSC ELEMENT, Odessa, Ukraine, e-mail: odessa@element.od.ua.

Grudinkin Viacheslav Mihailovich –deputy chief designer, JSC ELEMENT, Odessa, Ukraine, e-mail: odessa@element.od.ua.