

УДК 004.942

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

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ МЕТОДОВ ТРЕНДОВОГО АНАЛИЗА И КОНТРОЛЯ ПРИ АНАЛИЗЕ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ГАЗОТУРБИННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

В работе предлагается подход к совместному трендовому анализу и контролю временных рядов, образованных параметрами регистрации технического состояния газотурбинных двигателей в их длительной эксплуатации. Предлагаемый подход основан на формировании диагностической модели в виде полиномиальной аппроксимации дроссельных характеристик двигателя-эталона и выделении отклонений от указанной модели. Для полученных многомерных временных рядов отклонений от диагностической модели последовательно применяются известные методы трендового анализа и трендового контроля. Предлагаемый подход позволяет повысить надежность статистических выводов о техническом состоянии двигателя.

Ключевые слова: диагностика, временные ряды, трендовый контроль, техническое состояние

Введение

Проблемным вопросом совершенствования бортовых систем контроля и диагностики (БСКД) является повышение надежности статистических выводов о техническом состоянии газотурбинных двигателей (ГТД) в их длительной эксплуатации. Решение указанной проблемы достигается путем усовершенствования методов трендового контроля и анализа временных рядов, образуемых регистрируемыми термогазодинамическими и вибропараметрами ГТД.

Задача выделения трендов в указанных временных рядах, установления их закономерностей и уровня значимости имеет важное научно-прикладное значение, в частности, применительно к БСКД применяемых и создаваемых ГТД.

1. Формулирование проблемы

Методам анализа временных рядов посвящен обширный круг работ, в частности [1–4]. В БСКД находят применение различные трендовые статистики (Хальда-Аббе, кумулятивных сумм, F-критерий и др.) [4]. Общим недостатком известных методов трендового контроля является тот факт, что они позволяют установить лишь факт отсутствия тренда на заданном уровне значимости, поскольку именно так формулируется опорная гипотеза [8]. Опыт их применения свидетельствует о недопустимо высоком уровне ошибок первого (пропуск тренда) и второго (ложная тревога) рода. Высокое значение уровня ошибок второго рода снижает доверие к

надежности статистических выводов и диагностических решений. Методы трендового анализа лишены указанных системных недостатков и позволяют выделить трендовую компоненту временного ряда. Однако остается нерешенным вопрос об уровне значимости выделенной трендовой компоненты, поскольку наличие тренда является естественным фактором ввиду выработки ресурса.

Целью настоящей работы является обоснование подхода к комплексному применению методов трендового анализа и контроля технического состояния ГТД в их длительной эксплуатации путем последовательной реализации этапов оптимальной аппроксимации предполагаемой трендовой компоненты временного ряда, и применения статистик тренда к полученной трендовой компоненте для установления уровня ее статистической значимости.

2. Решение проблемы

Объектом исследования являются процессы изменения технического состояния ГТД в длительной эксплуатации.

Предметом настоящего исследования являются диагностические модели (ДМ), методы трендового контроля и анализа, позволяющие установить наличие трендовой компоненты на заданном уровне статистической значимости [2, 4, 6].

Центральной идеей (гипотезой) исследования является предположение, что в процессе эксплуатации ГТД неизбежно присутствует долговременный тренд параметров, однако этот тренд является следствием постепенной и естественной деградации их

дрессельных характеристик ввиду выработки ресурса. Поэтому только отклонение от ДХ двигателя в исправном состоянии дает информацию о техническом состоянии объекта. Подчиненная идея (гипотеза) состоит в том, что снижение уровня дисперсии остаточных отклонений (следовательно, снижение ошибок трендового контроля) достигается путем предварительного выделения трендовой компоненты.

Предлагаемый подход может быть определен как последовательное применение методов выделения наиболее существенной (по дисперсии) компоненты временного ряда отклонений от ДМ и методов трендового контроля для выделенной компоненты, а именно, как метод “trend and trend” – ТАТ [9].

При регистрации состояния ГТД в БСКД процессе наблюдения добавляются новые данные (временные срезы), которые образуют расширяющуюся совокупность:

$$\begin{aligned}\bar{x}_1 &= [x_1 \ x_2 \ \dots \ x_3], \\ \bar{x}_{21} &= [x_1 \ x_2 \ \dots \ x_n \ x_{n+1}], \\ &\dots \\ \bar{x}_{kn} &= [x_1 \ x_2 \ \dots \ x_n \ x_{n+k}].\end{aligned}$$

Следовательно, полная информация об изменении временного ряда содержится в траекторной матрице размером $n \cdot k$ [3]:

$$X_t = \begin{bmatrix} x_1 & x_2 & \dots & x_n \\ x_2 & x_3 & \dots & x_{n+1} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ x_k & x_{k+1} & \dots & x_{n+k-1} \end{bmatrix}. \quad (1)$$

Анализ траекторной матрицы (1) производится в соответствии с процедурой метода главных компонент [1], где под строками понимаются признаки, а столбцы образуют временные срезы. В качестве модели порождения данных предлагается следующая модель совокупности трендовой, циклической и помеховой (шумовой) компонент:

$$\begin{aligned}\bar{x}_k &= [x_k \ x_{k+1} \ x_{k+2} \ \dots \ x_{k+n-1}] = \\ &= \bar{x}_{tr} + \bar{x}_{cicle} + \bar{x}_{noise}.\end{aligned} \quad (1)$$

Задача анализа выборки данных (1) состоит в разделении ее строк в виде (2) на заданном уровне значимости.

Этапы алгоритма анализа временного ряда детально описаны в [6, 9]. В рамках предлагаемого

подхода в отличие от известного метода [3, 7] и траекторная матрица формируется не в виде матрицы Ганкеля, а в виде матрицы Теплица.

После выделения трендовой компоненты необходимо установление статистических свойства остатка $\bar{x}_{noise}$. Если остаточный временной ряд удовлетворяет критерию χ^2 выборки из генеральной совокупности нормально распределенных случайных величин, то разделение ряда (2) выполнено корректно. Если при этом СКО остаточной выборки не превышает погрешностей измерений, то разделение ряда (2) соответствует физическим особенностям наблюдаемых процессов.

Для иллюстрации эффективности предлагаемого подхода выполнен анализ баз данных регистрации технического состояния маршевой двигательной установки самолета Ил-76 с двигателем ПС-90А в длительной эксплуатации. Данные для АО «Элемент» представлены ЦИАМ (И. В. Егоров).

В соответствии с изложенным в [6] подходом, анализу подвергались ряды из отклонений параметров регистрации от полиномиальных регрессионных моделей взаимозависимостей переменных в установившихся режимах. Дроссельные характеристики указанного двигателя авторам не были предоставлены, поэтому регрессионные модели были получены непосредственно по базам данных регистрации.

Программно-алгоритмическое обеспечение трендового анализа для указанных примеров выполнено в среде MATLAB и позволило установить закономерности изменения технического состояния ГТД.

Результаты применения предлагаемого подхода для маршевой двигательной установки иллюстрируют рис. 1, на котором представлены трендовая статистика Хальда-Аббе, (в форме γ -критерия) для временного ряда отклонений от полиномиальной диагностической модели приведенных параметров давления за компрессором, а также для трендовой компоненты таких отклонений, и рис. 2, характеризующий те же параметры по оборотам турбины низкого давления (ТНД).

Анализ выполнен по траекторным матрицам шести параметров двигателя, которые регистрировались в течение более двухсот полетных циклов (около года). Окна трендового анализа и трендового контроля выбраны одинаковыми и составили 20 полетных циклов.

Как это следует из результатов обработки данных регистрации и видно на иллюстрациях, непосредственное применение трендовой статистики к временным рядам не выявляет наличие тренда. Имеет место ошибка первого рода: пропуск тренда. Только на этапе его излома, в последнем аварийном

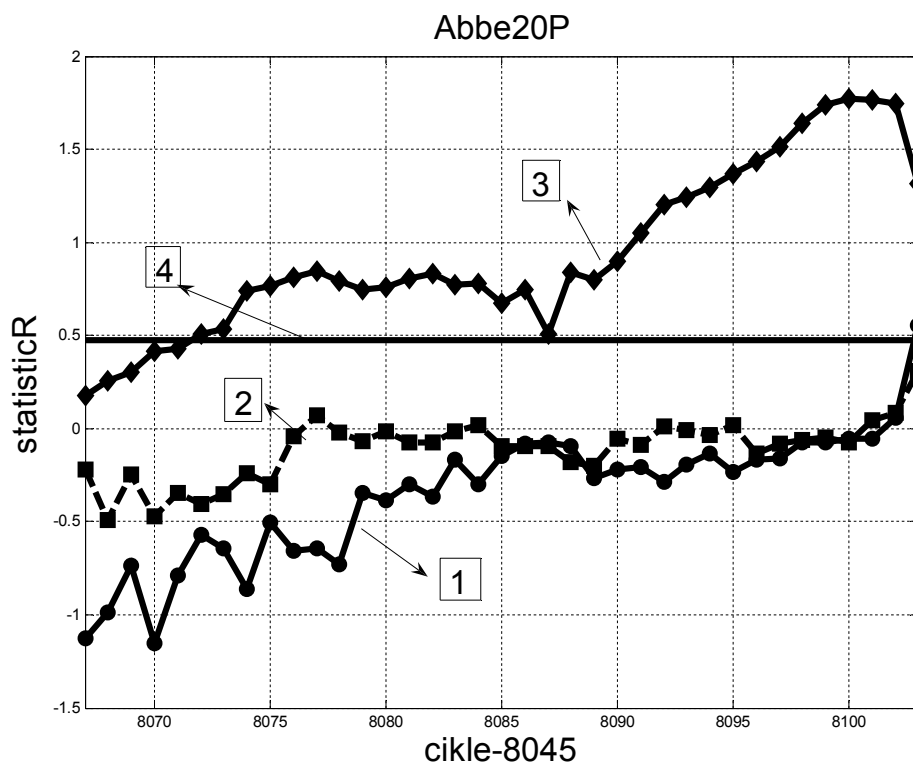


Рис. 1. Изменение статистики тренда для отклонений давления за компрессором:
1 – г-статистика для приведенных параметров, 2 – для отклонения от ДМ, 3 – для тренда, 4 – уровень 90%

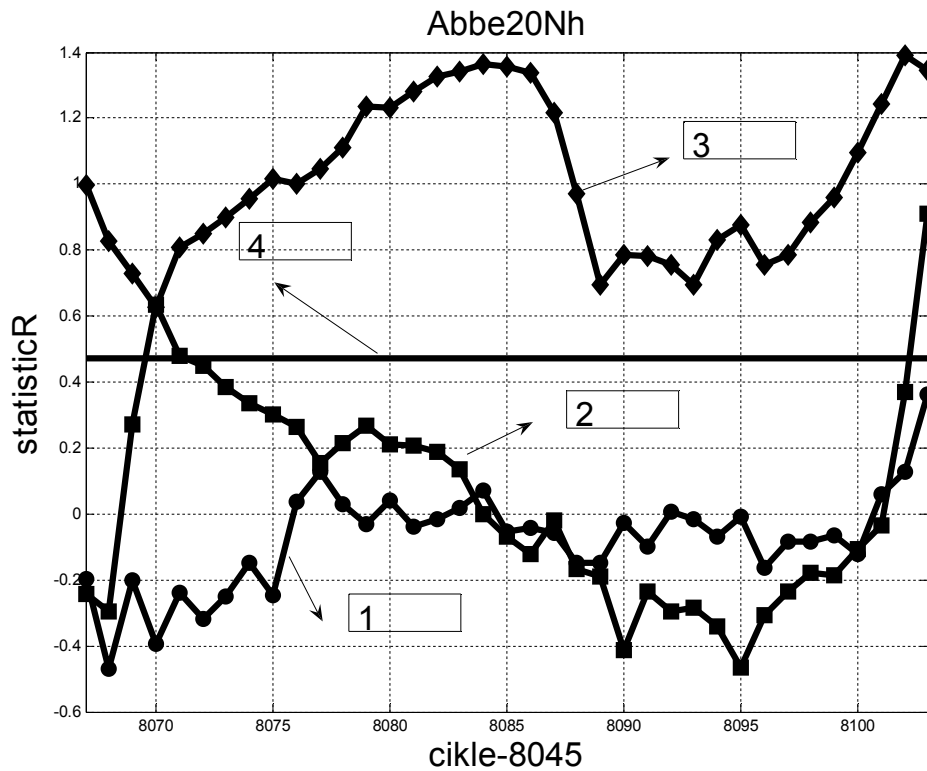


Рис. 2. Изменение статистики тренда для отклонений оборотов ТНД:
1 – г-статистика для приведенных параметров, 2 – для отклонения от ДМ, 3 – для тренда, 4 – уровень 90%

полетном цикле, фиксируется превышение порогового уровня. Применение решающей статистики γ -критерия к выделенной трендовой компоненте, напротив, дает основание установить наличие тренда в выборке отклонений от ДМ на уровне довери-

тельной вероятности, равном (0,9-0,95) уже на первых десятках полетных циклов, задолго до излома тренда.

На рис. 3 и рис. 4 представлены временные ряды отклонений и трендовые компоненты.

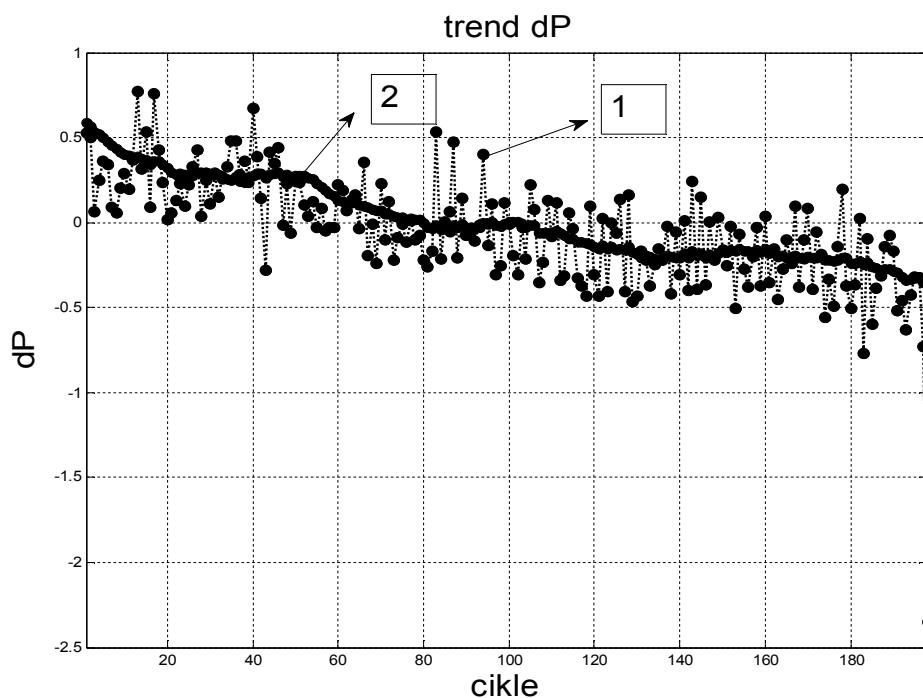


Рис. 3. Изменение отклонений давления за компрессором:
1 – временной ряд отклонений давления за компрессором, 2 – трендовая компонента

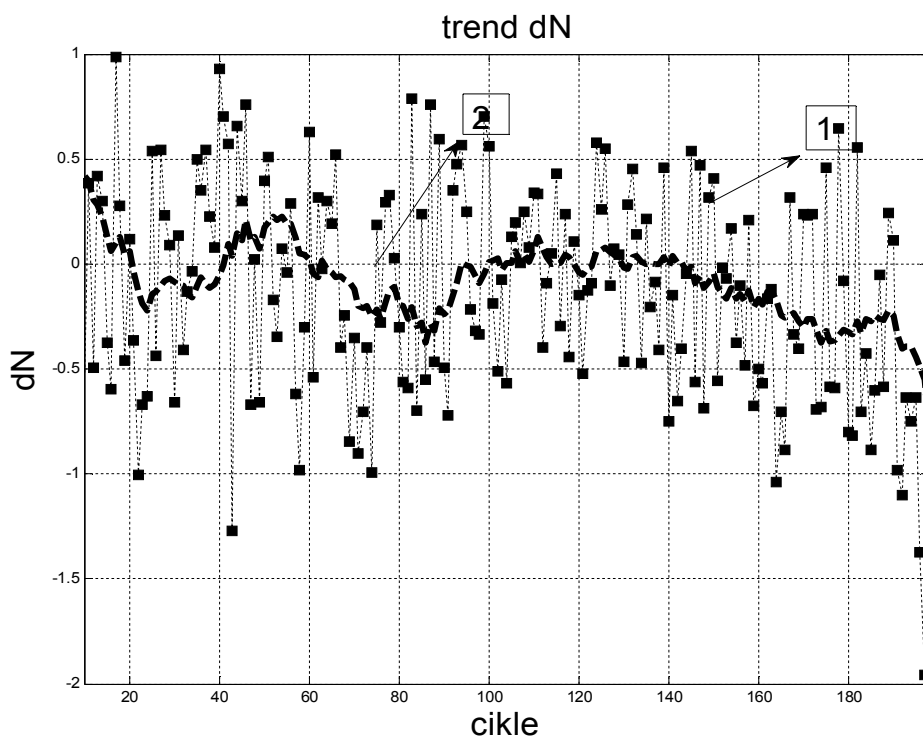


Рис. 4. Изменение отклонений оборотов ТНД:
1 – временной ряд отклонений оборотов ТНД, 2 – трендовая компонента

Последовательное применение методов трендового анализа и трендового контроля позволили установить деградацию компрессора высокого давления, что проявилось в изменении характеристик двигателя по давлению за компрессором и оборотам турбины низкого давления при поддержании постоянными оборотами турбины высокого давления. Такая деградация привела к излому тренда и последующему развитию аварийной ситуации.

Заключение

Последовательное сочетание методов трендового анализа и трендового контроля позволяет расширить признаковое пространство принятия решений и, тем самым, повысить надежность диагностических выводов. Такой переход возможен на основе формирования многомерных массивов из данных регистрации технического состояния и их оптимальной аппроксимации методом главных компонент. Применение статистик тренда к выделенным главным компонентам позволяет установить закономерности развития трендов и снизить вероятность ложных решений.

Перспективы дальнейших исследований заключаются в разработке методов прогноза развития трендов на основе анализа многомерных временных рядов.

Литература

1. Прикладная статистика. Классификация и снижение размерности [Текст] / С. А. Айвазян, В. М. Бухштабер, И. С. Енюков и др. – М.: Финансы и статистика, 1989. – 607 с.
2. Бендат, Дж. Прикладной анализ случайных данных [Текст] / Дж. Бендат, А. Пирсон – М.: Мир, 1989. – 540 с.
3. Главные компоненты временных рядов: метод "Гусеница" [Текст]; под ред. Д. Л. Данилова, А. А. Жиглявского. – Санкт-Петербург: ун-та, 1997. – 307 с.
4. Синтез систем управления и диагностики газотурбинных двигателей [Текст]: монография / С. В. Епифанов, Б. И. Кузнецов, И. Н. Богаенко и др. – К.: Техника, 1998. – 312 с.
5. Марпл мл., С. Л. Цифровой спектральный анализ и его приложения [Текст] / С. Л. Марпл мл. – М.: Мир, 1990. – 584 с.
6. 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 // *Авиационно-космическая техника и технология*. – 2008. – № 9 (56). – С. 192-197.
7. Elsner, I. B. *Singular Spectrum Analysis: A New Tool in Time Series Analysis* [Text] / I. B. Elsner, A. A. Tsonis. – New York, London: Plenum Press, 1996. – 164 p.

8. Perron, P. *Trend and Random Walks in Macroeconomic Time Series: Furter Evidence from a New Approach* [Text] / P. Perron // *Journal of Economic Dynamic and Control*. – 1988. – № 12. – P. 297-332.

9. Деренг, Е. В. Комбинированный метод ТАТ обработки многомерных временных рядов [Текст] / Е. В. Деренг, И. М. Гвоздева, В. Ф. Миргород // *Системні технології. Регіональний міжвуз. зб. наук. праць*. – 2013. – № 4 (87). – С. 21-27.

References

1. Ajvazjan, S. A., Buhshtaber, V. M., Enjukov, I. S., Meshalkin, L. D. *Prikladnaja statistika. Klassifikacija i snizhenie razmernosti* [Applied statistics. Classification and reduction of dimension]. Moscow, Finansy i statistika Publ., 1989. 607 p.
2. Bendat, Dzh., Pirson, A. *Prikladnoj analiz sluchajnyh dannyh* [Applied analysis of random data]. Moscow, Mir Publ., 1989. 540 p.
3. Red. Danilov, D. L., Zhigljavskogo, A. A. *Glavnye komponenty vremennyh rjadov: metod "Gusenica"* [The main components of time series: the "Caterpillar"]. St. Petersburg, 1997. 307 p.
4. Epifanov, S. V., Kuznecov, V. I., Bogaenko, I. I. *Sintez sistem upravlenija i diagnostirovanija gazoturbinnih dvigatelej* [Synthesis of control systems and diagnostics of gas turbine engines]. Kiev, Tehnika Publ, 1998. 312 p.
5. Marpl ml. S.L. *Cifrovoy spektral'nyj analiz i ego prilozhenija* [Digital Spectral Analysis and its Applications]. Moscow, Mir Publ., 1990. 584 p.
6. Mirgorod, V. F., Ranchenko, G. S. Kravchenko, V. M. *Primenenie diagnosticheskikh modelej i metodov trendovogo analiza dlja ocenki tehničeskogo sostojanija gazoturbinnih dvigatelej* [Application of diagnostic models and methods of trend analysis to assess the technical state of gas turbine engines]. *Aviacijno-kosmichna tehnika i tehnologija*, 2008, no. 9 (56), pp. 192-197.
7. Elsner, I. B. Tsonis, A. A. *Singular Spectrum Analysis: A New Tool in Time Series Analysis* [Singular Spectrum Analysis: A New Tool in Time Series Analysis]. New York, London, Plenum Press Publ., 1996. 164 p.
8. Perron, P. *Trend and Random Walks in Macroeconomic Time Series: Furter Evidence from a New Approach* [Trend and Random Walks in Macroeconomic Time Series: Furter Evidence from a New Approach]. *Journal of Economic Dynamic and Control*. 1988, no. 12, pp. 297-332.
9. Dereng, E. V. Gvozdeva, I. M., Mirgorod, V. F. *Kombinirovannyj metod TAT obrabotki mnogomernyh vremennyh rjadov* [Combined TAT method for multidimensional time series processing]. *Sistemni tehnologiji. Regional'nij mizhvuzivskij zbirnik naukovih prac'*. Dnipropetrovs'k [System technologies. Regional interuniversity collection of scientific works], 2013, no. 4 (87), pp. 21-27.

Поступила в редакцию 27.03.2017, рассмотрена на редколлегии 8.06.2017

Рецензент: д-р техн. наук, проф. Е. А. Арсирый, Институт компьютерных систем ОНПУ, Одесса, Украина.

ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ МЕТОДІВ ТРЕНДОВОГО АНАЛІЗУ І КОНТРОЛЮ ПРИ АНАЛІЗІ ТЕХНІЧНОГО СТАНУ ГАЗОТУРБІННИХ ДВИГУНІВ

В. Ф. Миргород, І. М. Гвоздева

У роботі пропонується підхід до спільного трендового аналізу і контролю часових рядів, утворених параметрами реєстрації технічного стану газотурбінних двигунів в їх тривалій експлуатації. Пропонований підхід заснований на формуванні діагностичної моделі у вигляді поліноміальної апроксимації дросельних характеристик двигуна-еталону і виділенні відхилень від вказаної моделі. Для отриманих багатовимірних часових рядів відхилень від діагностичної моделі послідовно застосовуються відомі методи трендового аналізу і трендового контролю. Пропонований підхід дозволяє підвищити надійність статистичних висновків про технічний стан двигуна.

Ключові слова: діагностика, часові ряди, трендовий контроль, технічний стан

INCREASING THE EFFICIENCY OF METHODS OF TREND ANALYSIS AND MONITORING AT GAS-TURBINE ENGINES TECHNICAL CONDITIONS ANALYSIS

V. M. Myrhorod, I. M. Hvozdeva

The paper suggests an approach to joint trend analysis and trend monitoring of time series formed by the parameters of gas-turbine engines technical conditions in their long-term operation. The proposed approach is based on forming the diagnostic model in the form of a polynomial approximation of the throttle characteristics for the reference motor and selecting the deviations from this model. For the obtained multidimensional time series of deviations from the diagnostic model, the known methods of trend analysis and trend monitoring are consistently applied. The proposed approach makes it possible to increase the reliability of statistical conclusions about the engines technical conditions.

Keywords: diagnostics, time series, trend monitoring, technical condition

Миргород Владимир Федорович – д-р техн. наук, вед. науч. сотр. АО «Элемент», Одесса, Украина, e-mail: v.f.mirgorod@gmail.com.

Гвоздева Ирина Маратовна – д-р техн. наук, вед. науч. сотр. АО «Элемент», Одесса, Украина, e-mail: v.f.mirgorod@gmail.com.

Mirgorod Vladimir Fedorovich - Doctor of Technical Science, Head Science Researcher JSC Element, Odessa, Ukraine, e-mail: v.f.mirgorod@gmail.com.

Gvozdeva Irina Maratovna - Doctor of Technical Science, Head Science Researcher JSC Element, Odessa, Ukraine, e-mail: v.f.mirgorod@gmail.com.