

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

## **СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ КРИТЕРИЕВ И МЕТОДОВ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ТРЕНДА ВО ВРЕМЕННЫХ РЯДАХ ПАРАМЕТРОВ РЕГИСТРАЦИИ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ГАЗОТУРБИННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ**

*Основные направления совершенствования процессов управления жизненным циклом силовых и энергетических установок на базе газотурбинных двигателей базируются на стратегии эксплуатации по техническому состоянию. Само понятие технического состояния и необходимость оценки тенденций его допустимого изменения обуславливают применение методов прикладной статистики для установления таких тенденций – трендов. Трендовый анализ в настоящее время сформировался в виде самостоятельного направления прикладной статистики ввиду специфики объекта исследования и важности прикладных применений. Проблемным вопросом реализации стратегии эксплуатации газотурбинных двигателей по техническому состоянию является обоснованный выбор таких критериев и методов определения тренда, которые в наибольшей мере соответствуют объектам диагностирования. Одной из наиболее важных задач анализа временных рядов является обоснование статистической модели порождения данных. Такая модель, или их совокупность, должны адекватно отображать изменение свойств объекта в процессе длительной эксплуатации, учитывать особенности силовых установок авиационного и наземного применения, а также опыт применения согласно руководству по эксплуатации. Следующей задачей является выбор и анализ критериев тренда и случайности применительно к временным рядам, состоящим из параметров регистрации технического состояния газотурбинных двигателей. Специфика трендовых критериев заключается в том, что на заданном уровне значимости может быть лишь опровергнута гипотеза о случайности временного ряда. Исследование альтернативы сталкивается со значительными трудностями, так как наличие тренда превращает временной ряд в нестационарный случайный процесс. В то же время практика применения требует рационального сочетания ошибок первого (ложная тревога) и второго (пропуск тренда) рода. Эксплуатация по техническому состоянию создает предпосылки для использования современных методов трендового анализа, которые позволяют разделить временной ряд на компоненты в соответствии с принятой статистической моделью порождения данных. Из группы таких методов целесообразно выделить методы ортогонального разложения (факторный анализ, метод главных компонент), так как они позволяют выполнить прогнозную оценку развития тренда. Однако предлагаемые методы имеют преимущественно скалярный характер, в то время как исходные данные о техническом состоянии газотурбинных двигателей представляют собой многомерные временные ряды выходных параметров, связанных между собой. Сравнительный анализ критериев и методов определения тренда во временных рядах параметров регистрации имеет важное прикладное значение, поскольку позволяет повысить достоверность статистических выводов о техническом состоянии газотурбинных двигателей.*

**Ключевые слова:** диагностика; техническое состояние; газотурбинный двигатель; временные ряды; статистическая модель; критерии тренда.

### **Введение**

Техническое состояние силовых и энергетических установок (СиЭУ) на базе газотурбинных двигателей (ГТД) устанавливается в системах контроля и диагностики (СКД) программно-алгоритмическими средствами контроля путем измерения совокупности параметров состояния и выходных параметров различных подсистем управления ГТД. Сравнение таких параметров с установленными руководством по эксплуатации (РЭ) позволяет выполнить допусковой контроль. Изменение техническо-

го состояния требует анализа на некотором промежутке времени (или летных циклах), что естественным образом приводит к необходимости исследования свойств временных рядов изменения параметров регистрации технического состояния ГТД.

Наиболее важной задачей такого исследования является установление наличия трендов и прогноз их развития. Поэтому методы прикладной статистики, в частности, методы трендового анализа временных рядов являются мощным инструментом для определения действительного технического состояния ГТД в составе СиЭУ. В нормативных докумен-

тах, в частности ISO 3977-9:1999 Gas turbines, такие методы рекомендуются для мониторинга технического состояния и прогноза и/или диагностики возможных отказов, ухудшения характеристик или необходимости в техническом обслуживании (например, трендовый анализ).

Поэтому сравнительный анализ критериев и методов определения тренда во временных рядах параметров регистрации имеет важное прикладное значение, поскольку позволяет повысить достоверность статистических выводов о техническом состоянии газотурбинных двигателей.

## 1. Формулирование проблемы

Закономерности процессов изменения состояния разнообразных систем, отображаемых во временных рядах, являются объектом исследования ряда фундаментальных работ [1– 6].

Проблема статистически обоснованной оценки технического состояния СиЭУ на базе ГТД по инструментальным данным в СКД требует разрешения ряда противоречий, состоящих, с одной стороны, в достаточности таких данных для предполагаемой оценки, и, с другой стороны, достаточности возможностей существующих методов прикладной статистики для такой оценки.

Первая составляющая в настоящее время не имеет существенных ограничений, поскольку программно-аппаратные средства бортовых СКД позволяют регистрировать достаточные объемы информации по всем регистрируемым параметрам. Вторая составляющая не исследована в должной мере, что не позволяет получить требуемые оценки на заданном или желаемом уровне значимости. Возможности существующих методов прикладной статистики не являются безграничными и их использование требует обоснования условий применения для получения обоснованных статистических выводов. Такие условия, во-первых, состоят в обосновании статистической модели порождения данных (СМПД). Такая модель, или их совокупность, должны адекватно отображать изменение свойств объекта в процессе длительной эксплуатации, учитывать особенности силовых установок авиационного и наземного применения, а также опыт применения согласно руководству по эксплуатации. Только при наличии СМПД может быть выполнен выбор критериев тренда и случайности применительно к временным рядам, состоящим из параметров регистрации технического состояния газотурбинных двигателей. Трендовые критерии, применительно к СиЭУ, наиболее рационально использовать для краткосрочного анализа. Эксплуатация по техническому состоянию создает предпосылки для исполь-

зования современных методов долгосрочного трендового анализа, которые позволяют разделить временной ряд в процессе длительной эксплуатации на ортогональные компоненты в соответствии с принятой СМПД.

## 2. Решение проблемы

### 2.1. Статистические модели

Статистической моделью порождения данных в настоящем исследовании полагается отображение реальных процессов изменения временных рядов в математическое описание таких процессов исходя из цели исследования. Как к любой математической модели (ММ), предъявляемые требования к СМПД состоят в адекватности и реализуемости, противоречивость которых является общеизвестным фактом. Сложность процессов преобразования энергии в ГТД не позволяет использовать ММ таких процессов в СКД. Следуя системному подходу, необходимо полагать, что ГТД является сложной системой, которая функционирует в условиях влияния множества детерминированных и случайных воздействий, результат влияния которых фиксируется в виде совокупности измеряемых параметров, представленных измерениями в дискретные моменты времени, и образующих временные ряды. Математическое описание такого системного оператора в настоящее время еще не является полностью исследованным. Поэтому применяются более простые эмпирические модели, для которых возможно использование методов прикладной статистики.

Наиболее простой СМПД, применяемой при анализе временных рядов, является аддитивная смесь детерминированной и случайной компонент:

$$x_n = f_n + \xi_n, \quad (1)$$

где  $f_n$  – детерминированная компонента,  $f_n = f(t)_{t=t_n}$  – решетчатая функция некоторой непрерывной детерминированной функции времени,  $\xi_n$  – реализация дискретного случайного процесса (СП). Эта СМПД в общем случае является основополагающей для совокупности методов трендового анализа. Детализация детерминированной компоненты, которая полагается трендовой, приводит к разнообразным моделям тренда [1– 6]. Для случайной компоненты предполагается гипотеза о выборке из генеральной совокупности независимых случайных величин, как правило, с нормальным распределением. Опыт эксплуатации СКД, и, в частности, бортовых СКД (БСКД), указывает на несовершенство указанной СМПД.

Во-первых, эксплуатация ГТД в составе СиЭУ авиационного и наземного применения, с точки зрения решения задач трендового анализа, существенно отличаются. В первом случае, для маршевых двигательных установок (МДУ), характерно разнообразие режимов (номинальный, крейсерский, взлетный и другие). Во втором случае характерно поддержание установившегося номинального режима работы. Исходные данные в первом случае разделены неравноотстоящими промежутками соответственно принятым полетным циклам, а для наземных СиЭУ исходные данные являются равноотстоящими по времени.

Во-вторых, фиксируемые в СКД (БСКД) термогазодинамические параметры, как правило, приводятся к стандартным атмосферным условиям (САУ.), что позволяет учесть изменение параметров температуры и давления заторможенного потока на входе в ГТД. Указанные параметры внешней среды также являются случайными процессами со своим характерным временем изменения (sample time). Их измерение сопровождается собственными ошибками и распределением этих ошибок. Формулы приведения являются нелинейными функциями относительно указанных параметров, что существенно усложняет задачу анализа таких временных рядов. Заметим, что приведение к САУ для ТРДД является достаточно адекватным, однако для турбовальных ГТД, а таким образом для всех наземных и авиационных ТВаД) является весьма приближенным ввиду отличия теории подобия газовых потоков от реальных условий работы ГТД. Таким образом, анализируемый класс объектов может быть условно разделен на следующие группы:

СиЭУ авиационного применения на основе ТРДД и аналогичных схем, для которых исходные данные в смежных полетных циклах являются независимыми;

СиЭУ наземного применения на основе ТВаД и аналогичных схем, для которых исходные данные в смежных измерениях не являются независимыми;

СиЭУ авиационного применения на основе ТВаД и аналогичных схем, для которых исходные данные в смежных полетных циклах являются независимыми.

Первая группа соответствует многорежимным МДУ, вторая – наземным установкам, третья – МДУ винтокрылой авиации. Для каждой из этих групп, с точки зрения трендового анализа, следует предложить СМПД, что обусловит соответствующие методы трендового контроля и анализа.

Для первой выделенной группы, ввиду многорежимности условий эксплуатации, предлагается СМПД в виде отклонений от номинальных дрос-

сельных характеристик ГТД, оговоренных документацией на двигатель [7].

Для второй выделенной группы, ввиду условий эксплуатации, предлагается СМПД в виде

$$x_n = f_{n,trend} + f_{n,cycle} + \zeta_n + \xi_n, \quad (2)$$

где  $f_{n,trend}$  – детерминированная компонента,  $f_{n,cycle}$  – циклическая (сезонная) компонента,  $\zeta_n$  – реализация дискретного случайного процесса изменения состояния,  $\xi_n$  – реализация дискретного случайного процесса ошибок измерений.

Для третьей выделенной группы, ввиду условий эксплуатации, предлагается наиболее сложная СМПД в виде композиции моделей первой и второй групп.

## 2.2. Критерии тренда и случайности

Критерии тренда и случайности являются критериями различения гипотез и основаны на различных статистиках. В общем случае формируется статистика – дискретный функционал  $T(x_k, N)$  на выборках временного ряда  $x_k$  длиной в  $N$  отсчетов. На основе статистики формируется критерий различения гипотез:

$$\left. \begin{aligned} H_0 : T(x_k, N) \leq C_\alpha \\ H_1 : T(x_k, N) > C_\alpha \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

где  $H_0$  – гипотеза принадлежности к выборке из генеральной совокупности независимых случайных величин (СВ) с известными (например, нормальное распределение) свойствами,  $H_1$  – альтернативная гипотеза,  $C_\alpha$  – пороговое значение критерия, которое отвечает заданному уровню значимости  $\alpha$ .

В рамках классической теории различения гипотез следует обратить внимание на следующее обстоятельство: отвержение гипотезы на заданном уровне значимости (вероятность ложной тревоги) вовсе не означает наличие тренда в выборке. Такое решение может быть обусловлено, в частности, коррелированностью выборки или негауссовским законом распределения ее отсчетов. Игнорирование этого известного свойства трендовых статистик приводит к увеличению потока ложных тревог и, как следствие, снижению доверия к статистическим выводам БСКД. Поэтому при отборе критериев тренда и случайности необходимо выделить такие из них, чувствительность которых к указанным факторам является наименьшей.

Исчерпывающей характеристикой критерия различения гипотез является его оперативная характеристика: зависимость мощности критерия от веро-

ятности ложной тревоги и параметров выборки. Исследованиям мощности критериев тренда и случайности в настоящее время уделяется недостаточное внимание ввиду сложности поставленной задачи. Частные результаты для СМПД с наиболее простым линейным трендом требуют обобщения, однако уже указывают на высокую вероятность пропуска тренда для ряда общепринятых критериев.

Известные критерии тренда и случайности классифицируются, как правило, на параметрические и непараметрические. В свою очередь, параметрические критерии основаны на значимости выборочного коэффициента корреляции и/или отношения дисперсий. Соответственно, критерии значимости выборочного коэффициента корреляции в наибольшей степени соответствуют временным рядам с априори независимыми отсчетами, то есть БСКД СИЭУ авиационного применения. Критерии, основанные на отношении дисперсий, следует рекомендовать для СКД СИЭУ наземного применения, разумеется, после исключения влияния циклической компоненты.

Непараметрические критерии имеют установленную высокую эффективность в балансе мощность – вероятность ложной тревоги, нечувствительность к коррелированности выборки и отличия от гауссовского распределения и могут быть рекомендованы для применения в условиях априорной неопределенности относительно характера случайных возмущений при наличии выборок достаточного объема для их применения.

### 2.3. Методы определения тренда

Эксплуатация по техническому состоянию создает предпосылки для использования современных методов трендового анализа, которые позволяют разделить временной ряд на компоненты в соответствии с принятой статистической моделью порождения данных. Из группы таких методов целесообразно выделить методы ортогонального разложения (факторный анализ, метод главных компонент и другие), так как они позволяют выполнить прогнозную оценку развития тренда. Отличительной особенностью временных рядов параметров регистрации технического состояния ГТД в длительной эксплуатации является их многомерный характер. Фиксируемые в БСКД отсчеты термогазодинамических параметров связаны между собой дроссельными характеристиками (ДХ) двигателя и испытывают возмущения в силу возможных ошибок измерения и возможной деформации таких характеристик. Установление деформаций ДХ, выходящих за пределы ТУ, и является целью трендового анализа.

Так как предлагаемые в настоящее время известные методы трендового анализа предназначены для скалярных временных рядов авторами предложены методы двумерного [7 – 9] и многомерного трендового анализа, которые позволяют установить взаимосвязь трендов различных термогазодинамических параметров ГТД в процессе длительной эксплуатации и, тем самым, разделить пространство признаков на кластерообразующие группы. Основной гипотезой, предлагаемой авторами, является отображение плоскостей, полученных в результате трендового анализа взаимосвязанных трендов на плоскость дроссельных характеристик конкретного ГТД, установленных в процессе стендовых испытаний в границах ТУ. Ортогональность разложения многомерного временного ряда позволяет выполнить прогноз развития его тренда на ряд предстоящих полетных циклов и вероятность выхода за пределы, установленные ТУ.

### Заключение

Одной из наиболее важных задач анализа временных рядов является обоснование статистической модели порождения данных. Такая модель, или их совокупность, должны адекватно отображать изменение свойств объекта в процессе длительной эксплуатации, учитывать особенности силовых установок авиационного и наземного применения, а также опыт применения согласно руководству по эксплуатации. Выбор и анализ критериев тренда и случайности применительно к временным рядам, состоящим из параметров регистрации технического состояния газотурбинных двигателей. Эксплуатация по техническому состоянию создает предпосылки для использования современных методов трендового анализа, которые позволяют разделить временной ряд на компоненты в соответствии с принятой статистической моделью порождения данных. Из группы таких методов целесообразно выделить методы ортогонального разложения (факторный анализ, метод главных компонент), так как они позволяют выполнить прогнозную оценку развития тренда. Однако предлагаемые методы имеют преимущественно скалярный характер, в то время как исходные данные о техническом состоянии газотурбинных двигателей представляют собой многомерные временные ряды выходных параметров, связанных между собой.

Сравнительный анализ критериев и методов определения тренда во временных рядах параметров регистрации имеет важное прикладное значение, поскольку позволяет повысить достоверность статистических выводов о техническом состоянии газотурбинных двигателей.

## Література

1. Kendall, M. *The advanced theory of statistics [Text]* / M. Kendall, A. Stuart. – Hafner, New York, 1979. – Vol. 2. – 748 p.
2. Anderson, O. D. *Time series analysis and forecasting [Text]* / O. D. Anderson. – Butterworths, London, 1976. – 182 p.
3. Box, G. E. P. *Time series analysis: Forecasting and control [Text]* / G. E. P. Box, G. M. Jenkins. – Holden Day, San Francisco, 1976. – 575 p.
4. Montgomery, D. C. *Forecasting and time series analysis [Text]* / D. C. Montgomery, L. A. Johnson, J. S. Gardiner. – McGraw-Hill, New York, 1990. – 381 p.
5. Shumway, R. H. *Applied statistical time series analysis [Text]* / R. H. Shumway. – Prentice Hall, New York, 1988. – 384 p.
6. Wei, W. W. *Time series analysis: Univariate and multivariate methods [Text]* / W. W. Wei. – Addison-Wesley, New York, 1989. – 640 p.
7. Hvozdeva, I. *The Method of Trend Analysis of Parameters Time Series of Gas-turbine Engine State [Text]* / I. Hvozdeva, V. Myrhorod, Y. Derenh // *AMiTaNS'17, AIP Conf. Proc. edited by M. D. Todorov. – American Institute of Physics, Melville, NY, 2017. – Vol. 1895. – P. 030002-1-030002-9. DOI: 10.1063/1.5007361.*
8. Myrhorod, V. *Some Interval and Trend Statistics with Non-Gaussian Initial Data Distribution [Text]* / V. Myrhorod, I. Hvozdeva, V. Demirov // *AMiTaNS'18, AIP Conf. Proc., edited by M. D. Todorov. – American Institute of Physics, Melville, NY, 2018. – Vol. 2025. – P. 040011-1-040011-12. DOI: 10.1063/1.5064895.*
9. Myrhorod, V. *Two-dimensional trend analysis of time series of complex technical objects diagnostic parameters [Text]* / V. Myrhorod, I. Hvozdeva, Y. Derenh / *11th International Conference for Promoting the Application of Mathematics in Technical and Natural Sciences - AMiTaNS'19, AIP Conference Proceedings, 060013. – 2019. – Vol. 2164, no. 1. – P. 040011-1-040011.*

## References

1. Kendall, M., Stuart, A. *The advanced theory of statistics*. Hafner, New York, 1979, Vol. 2. 748 p.
2. Anderson, O. D. *Time series analysis and forecasting*. Butterworths, London, 1976. 182 p.
3. Box, G. E. P., Jenkins, G. M. *Time series analysis: Forecasting and control*. Holden Day, San Francisco, 1976. 575 p.
4. Montgomery, D. C., Johnson, L. A., Gardiner, J. S. *Forecasting and time series analysis*. McGraw-Hill, New York, 1990. 381 p.
5. Shumway, R. H. *Applied statistical time series analysis*. Prentice Hall, New York, 1988. 384 p.
6. Wei, W. W. *Time series analysis: Univariate and multivariate methods*. Addison-Wesley, New York, 1989. 640 p.
7. Hvozdeva, I., Myrhorod, V., Derenh, Y. The Method of Trend Analysis of Parameters Time Series of Gas-turbine Engine State. In *AMiTaNS'17, AIP Conf. Proc. edited by M. D. Todorov. American Institute of Physics, Melville, NY, 2017, vol. 1895, pp. 030002-1-030002-9. DOI: 10.1063/1.5007361.*
8. Myrhorod, V., Hvozdeva, I., Demirov, V. Some Interval and Trend Statistics with Non-Gaussian Initial Data Distribution. In *AMiTaNS'18, AIP Conf. Proc. edited by M. D. Todorov. American Institute of Physics, Melville, NY, 2018, vol. 2025, pp. 040011-1-040011-12. DOI: 10.1063/1.5064895.*
9. Myrhorod, V., Hvozdeva, I., Derenh, Y. Two-dimensional trend analysis of time series of complex technical objects diagnostic parameters. *11th International Conference for Promoting the Application of Mathematics in Technical and Natural Sciences - AMiTaNS'19, AIP Conference Proceedings, 060013, 2019, vol. 2164, no. 1, pp. 040011-1-040011-12, DOI: 10.1063/1.5130815.*

Надійшла до редакції 01.07.2021, розглянута на редколегії 20.08.2021

## ПОРІВНЯЛЬНИЙ АНАЛІЗ КРИТЕРІЇВ ТА МЕТОДІВ ВСТАНОВЛЕННЯ ТРЕНДУ В ЧАСОВИХ РЯДАХ ПАРАМЕТРІВ РЕЄСТРАЦІЇ ТЕХНІЧНОГО СТАНУ ГАЗОТУРБІННИХ ДВИГУНІВ

**В. Ф. Миргород, І. М. Гвоздева**

Основні напрямки удосконалення процесів управління життєвим циклом силових і енергетичних установок на базі газотурбінних двигунів базуються на стратегії експлуатації за технічним станом. Саме поняття технічного стану та необхідність оцінки тенденції його допустимої зміни обумовлюють застосування методів прикладної статистики для встановлення таких тенденцій – трендів. Трендовий аналіз в даний час сформувався у вигляді самостійного напрямку прикладної статистики зважаючи на специфіку об'єкта дослідження і важливості прикладних застосувань. Проблемним питанням реалізації стратегії експлуатації газотурбінних двигунів за технічним станом є обґрунтований вибір таких критеріїв і методів визначення тренда, які в найбільшій мірі відповідають об'єктам діагностування. Одним з найбільш важливих завдань аналізу часових рядів є обґрунтування статистичної моделі породження даних. Така модель, або їх сукупність, повинні адекватно відображати зміна властивостей об'єкта в процесі тривалої експлуатації, враховувати особливості силових установок авіаційного і наземного застосування, а також досвід застосування згідно керівництву по

експлуатації. Наступним завданням є вибір і аналіз критеріїв тренда і випадковості стосовно часових рядів, що складаються з параметрів реєстрації технічного стану газотурбінних двигунів. Специфіка трендових критеріїв полягає в тому, що на заданому рівні значущості може бути лише спростована гіпотеза про випадковість часового ряду. Дослідження альтернативи стикається зі значними труднощами, так як наявність тренда перетворює часовий ряд в нестационарний випадковий процес. У той же час практика застосування вимагає раціонального поєднання помилок першого (помилкова тривога) і другого (пропуск тренда) роду. Експлуатація за технічним станом створює передумови для використання сучасних методів трендового аналізу, які дозволяють розділити часовий ряд на компоненти відповідно до прийнятої статистичної моделі породження даних. З групи таких методів доцільно виділити методи ортогонального розкладання (факторний аналіз, метод головних компонент), так як вони дозволяють виконати прогностичну оцінку розвитку тренда. Однак запропоновані методи мають переважно скалярний характер, в той час як вихідні дані про технічний стан газотурбінних двигунів є багатовимірні часові ряди вихідних параметрів, пов'язаних між собою. Порівняльний аналіз критеріїв і методів визначення тренда в часових рядах параметрів реєстрації має важливе прикладне значення, оскільки дозволяє підвищити достовірність статистичних висновків про технічний стан газотурбінних двигунів.

**Ключові слова:** діагностика; технічний стан; газотурбінний двигун; часові ряди; статистична модель; критерії тренда.

### COMPARATIVE ANALYSIS OF CRITERIA AND METHODS FOR DETERMINING THE TREND IN THE TIME SERIES OF PARAMETERS FOR RECORDING THE TECHNICAL STATE OF GAS TURBINE ENGINES

*V. Myrhorod, I. Hvozdeva*

The main directions of improving the processes of life cycle management of power and power plants based on gas turbine engines are based on the strategy of operation according to the technical state. The very concept of a technical condition and the need to assess the tendencies of its permissible change determine the use of applied statistics methods to establish such tendencies - trends. Trend analysis has now emerged as an independent direction in applied statistics due to the specifics of the research object and the importance of applied applications. The problematic issue of the implementation of the strategy for the operation of gas turbine engines according to the technical condition is the reasonable choice of such criteria and methods for determining the trend, which are most consistent with the objects of diagnostics. One of the most important tasks of time series analysis is to substantiate the statistical model of data generation. Such a model, or their combination, should adequately reflect the change in the properties of an object during long-term operation, take into account the features of power plants for aviation and ground use, as well as the experience of use according to the operation manual. The next task is to select and analyze the trend and randomness criteria in relation to the time series, consisting of the parameters for registering the technical state of gas turbine engines. The specificity of trend criteria lies in the fact that at a given level of significance, the hypothesis about the randomness of the time series can only be refuted. The study of an alternative encounters significant difficulties, since the presence of a trend turns a time series into a non-stationary random process. At the same time, the practice of application requires a rational combination of errors of the first (false alarm) and second (trend skipping) kind. Operation by technical condition creates the prerequisites for the use of modern trend analysis methods, which allow dividing the time series into components in accordance with the accepted statistical model of data generation. From the group of such methods, it is advisable to single out the methods of orthogonal decomposition (factor analysis, the method of principal components), since they allow making a predictive assessment of the development of a trend. However, the proposed methods are predominantly scalar in nature, while the initial data on the technical condition of gas turbine engines are multidimensional time series of output parameters related to each other. Comparative analysis of the criteria and methods for determining the trend in the time series of registration parameters is of great practical importance, since it allows increasing the reliability of statistical conclusions about the technical condition of gas turbine engines.

**Keywords:** diagnostics; technical condition; gas turbine engine; time series; statistical model; trend criteria.

**Миргород Владимир Федорович** – д-р техн. наук, ст. науч. сотрудник АО «Элемент», Одесса, Украина.

**Гвоздева Ирина Маратовна** – д-р техн. наук, ст. науч. сотрудник АО «Элемент», Одесса, Украина.

**Volodymyr Mirgorod** – Doctor of science, senior scientist JSC «Element», Odesa, Ukraine, e-mail: v.f.mirgorod@gmail.com, ORCID: 0000-0001-8361-1672.

**Iryna Gvozdeva** – Doctor of science, senior scientist JSC «Element», Odesa, Ukraine, e-mail: onopchenko.im@gmail.com, ORCID: 0000-0001-5797-0559.