

УДК 004.942 : 629.4.001.4

В. Ф. МИРГОРОД<sup>1</sup>, Е. В. ДЕРЕНГ<sup>2</sup><sup>1</sup> АО «Элемент», Одесса, Украина<sup>2</sup> Институт проблем моделирования в энергетике им. Г. Е. Пухова, Киев, Украина

## ДОПУСКОВЫЙ ТРЕНДОВЫЙ КОНТРОЛЬ ТЕРМОГАЗОДИНАМИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ СИЛОВЫХ УСТАНОВОК

*Рассмотрена задача оценки технического состояния газотурбинных двигателей силовых установок авиационного применения по данным регистрации термогазодинамических параметров в длительной эксплуатации. Предложен подход к получению данных о техническом состоянии на основе выделения трендов отклонений от заданных дроссельных характеристик и последующей их оценки относительно переменных на режимах полей допусков. Выполнено тестирование предложенного подхода, на примере ГТД маршевой двигательной установки. Установлена возможность повышения надежности оценки технического состояния за счет совместного анализа трендов отклонений от полей допусков. Предлагается полиномиальная аппроксимация границ допусков деформации дроссельных характеристик. Разработано программно-алгоритмическое обеспечение для реализации предлагаемого подхода.*

**Ключевые слова:** газотурбинный двигатель, диагностики, диагностическая модель, трендовый анализ, допускной контроль

### Введение

Управление жизненным циклом сложных технических объектов (СТО) и силовых установок на базе газотурбинных двигателей (ГТД), в частности, требует достоверной оценки технического состояния по данным регистрации измеряемых параметров (координат) в течение эксплуатации. Реализация новых подходов управления ресурсом СТО требует разрешения ряда научных и прикладных задач, важнейшими из которых являются задачи построения адекватных диагностических моделей и методов оценки отклонений параметров СТО в эксплуатации от номинального состояния. Разрешение указанной проблемы достигается повышением надежности статистических выводов о техническом состоянии СТО путем усовершенствования диагностических моделей порождения данных и методов трендового контроля и анализа временных рядов, образуемых регистрируемыми параметрами.

### 1. Формулирование проблемы

Многолетний опыт применения методов трендового контроля применительно к задачам диагностики технического состояния ГТД обобщен в [1] и других работах школы проф. С. В. Епифанова (ХАИ). Вопросам анализа и выделения трендов параметров ГТД в эксплуатации посвящены работы [2, 3]. Следуя [4] и [5 – 7], окончательное решение по диагностической ситуации рекомендуется при-

нимать по диаграмме совместных трендов. Однако в действующих нормативных документах (Руководство по эксплуатации – РЭ) ГТД применяются методы допускного контроля, что требует разработки методов сочетания методов трендового анализа с известными методами диагностирования.

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

### 2. Решение проблемы

Объектом исследования являются процессы изменения совокупности параметров СТО в долговременной эксплуатации.

Предметом настоящего исследования являются математические модели трендов изменения состояния СТО и методы допускного контроля трендов.

Применяемый метод диагностирования состоит из последовательно реализуемых следующих этапов [3, 5]: приведение термогазодинамических параметров ГТД к стандартным атмосферным условиям, построение индивидуальных диагностических моделей по данным стендовых испытаний и эксплуатации в виде нелинейных регрессионных зависимостей, выделение трендов отклонений с учетом диагностических моделей: факторный анализ трендов отклонений, сингулярный трендовый анализ отклонений от диагностических моделей, оценка характе-

ра остаточных отклонений после выделения трендов.

Существенными особенностями предлагаемой в данной работе методики являются тот факт, что для конкретизации результатов трендового анализа рассматривается тренд отклонений от заданного поля допусков. Поля допусков, как правило, не являются равномерными, поскольку допуски на различных режимах являются различными.

Предлагаемая информационная технология интервального (допускового) трендового анализа заключается в следующем:

1. Формируются выборки (временные ряды) исследуемых параметров ГТД (обороты турбин, давление за компрессором, температуры за турбинами, расход топлива и т.п.) и параметры внешних условий (температура и давление на входе) на стационарных режимах (взлет, МКР и т.д.)

2. Выполняется приведение термогазодинамических параметров (ТГДП) ГТД к стандартным атмосферным условиям (с.а.у.): давление и температура заторможенного потока на входе  $T_{bx}$ ,  $P_{bx}$ . В результате образуются вектор временных рядов приведенных параметров ГТД:  $\bar{y}_{tr}$ .

3. Отсчеты приведенных ТГДП сравниваются с расчетными (либо полученными при стендовых испытаниях данного экземпляра двигателя) по дроссельным характеристикам (ДХ), которые являются СХ исследуемого объекта, для каждого значения режимного параметра  $s$ , по которому регулируется двигатель (степень повышения давления, обороты турбины высокого давления, расход топлива и т.п.)  $\bar{y}^n(s, T_{bx}, H_{bx})$ .

4. Если информация о ДХ отсутствует, тактовые данные следует получить путем полиномиальной аппроксимации искомых зависимостей непосредственно по данным измерений.

5. В результате должны быть получены временные ряды отклонений ТГДП от диагностической модели (ДМ) нормального состояния ГТД:

$$\Delta \bar{y} = \bar{y}_{tr} - \bar{y}^n(s, T_{bx}, P_{bx}).$$

6. Аналогично формируются временные ряды от верхнего и нижнего допусков ДХ:

$$\Delta \bar{y}_{\max} = \Delta \bar{y}_{tr} - \bar{y}^{\max}(s, T_{bx}, H_{bx}),$$

$$\Delta \bar{y}_{\min} = \Delta \bar{y}_{tr} - \bar{y}^{\min}(s, T_{bx}, H_{bx}).$$

7. Получаемые временные ряды отклонений от ДМ верхнего и нижнего полей допусков подвергаются скалярному или многомерному трендовому анализу согласно [6, 7, 8].

8. Выделенные тренды переносятся на плоскость ДХ и формируется диагностическое сообщение: если  $\text{trend}[\Delta \bar{y}_{\min}]$  и/или  $\text{trend}[\Delta \bar{y}_{\max}]$  на-

правлены вне поля допусков или выходят за его пределы, то объект диагностирования не соответствует РЭ.

Дополнительно выполняется интервальная оценка трендов на заданном уровне значимости согласно [5, 6, 7] и также формируется диагностическое сообщение. Если доверительный интервал тренда отклонений находится внутри поля допусков, то с указанной доверительной вероятностью можно утверждать, что объект диагностирования находится в номинальном состоянии.

Идея настоящего исследования состоит в том, что первоначально формируются номинальные поля допусков ДХ, иллюстративно представленные на рис. 1.

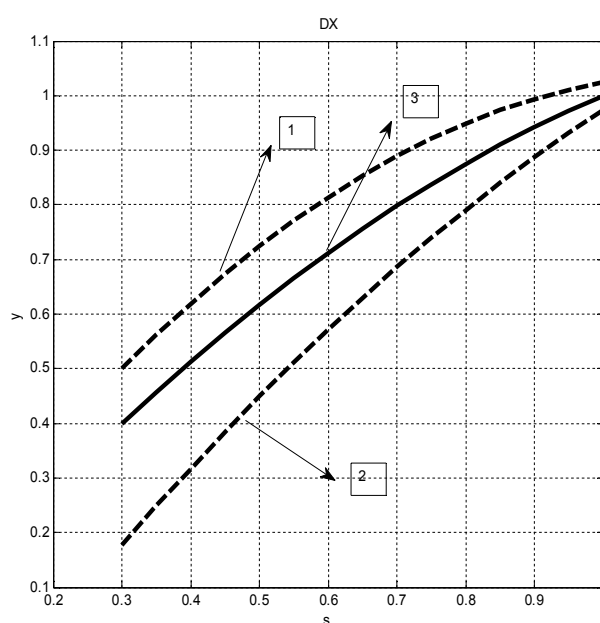


Рис. 1. Номинальная ДХ – 1  
и поля допусков – 2, 3

Иллюстративные модели деформации ДХ в процессе эксплуатации рассматриваются в следующих формах: смещение – рис. 2, поворот – рис. 3, смещение и поворот – рис. 4.

На рис. 5 и рис. 6 представлены результаты допускового трендового контроля, согласно предлагаемого подхода, для примера, рассмотренного в [7,9]: анализ технического состояния МДУ на основе ГТД ПС – 90А по отклонениям температуры и давления за компрессором.

Как это следует из результатов анализа и приведенных иллюстраций, тренды отклонений температуры и давления за компрессором направлены вне поля допусков и выходит за его пределы, следовательно объект диагностирования не соответствует требованиям эксплуатации. Причина указанного явления состоит в смещении ДХ двигателя: по тем-

пературе в сторону более высоких значений относительно номинальных, по давлению за компрессором – в сторону меньших значений, при поддержании неизменными оборотов турбины высокого давления.

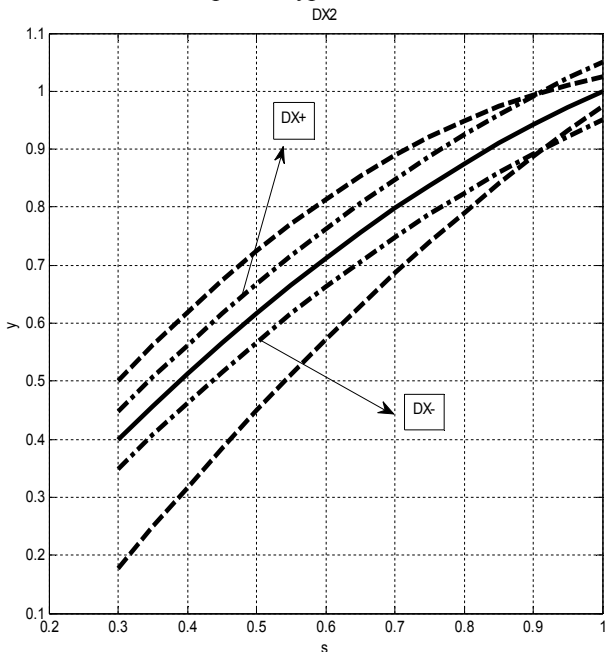


Рис. 2. Смещение номинальной ДХ

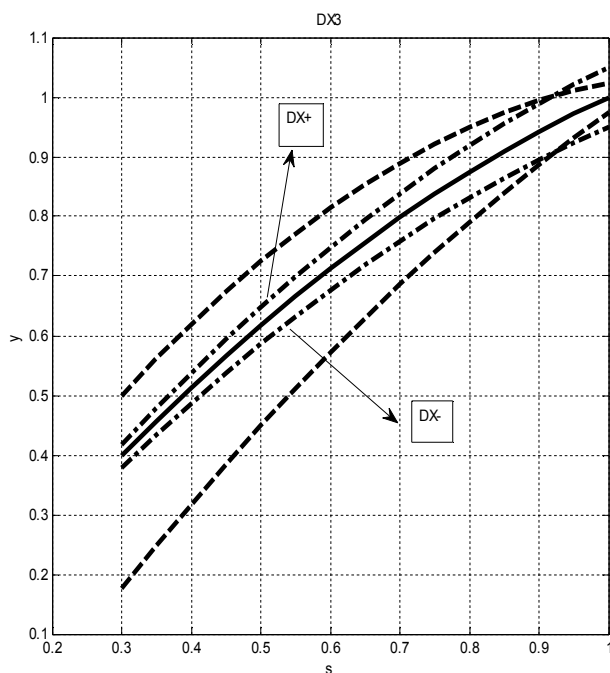


Рис. 3. Поворот номинальной ДХ

### Заключение

Предлагаемый подход к интервальному (допусковому) трендовому анализу позволяет расширить признаковое пространство принятия решений и, тем самым, повысить надежность диагностиче-

ских выводов. Такой подход реализуется на основе формирования переменных по режимам полей допусков взаимозависимостей параметров ГТД, построению трендов отклонений относительно границ указанных допусков и анализу границ и направленности указанных трендов.

Перспективы дальнейших исследований заключаются в разработке методов допускового анализа многомерных трендов.

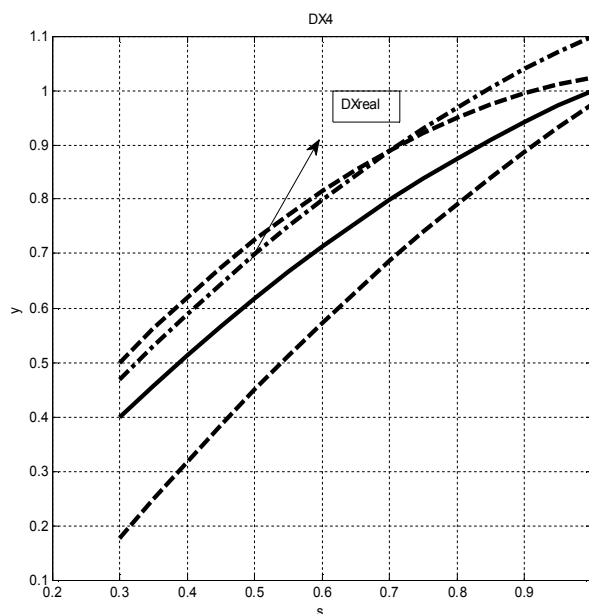


Рис. 4. Смещение и поворот номинальной ДХ

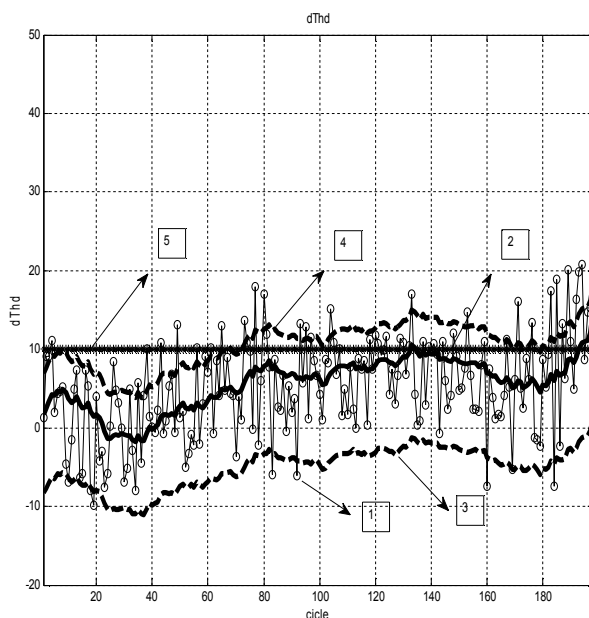


Рис. 5. Результаты допускового трендового контроля МДУ по температуре:  
 1 – выборка отклонений; 2 – тренд выборки;  
 3, 4 – тренды относительно допусков;  
 5 – заданные границы

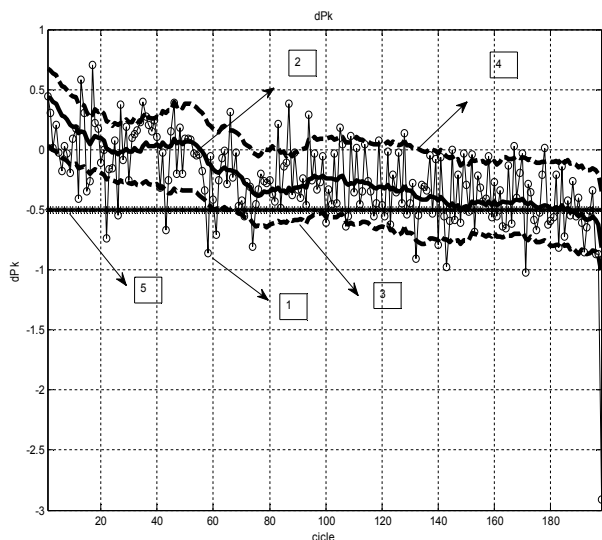


Рис. 6. Результаты допускового трендового контроля МДУ по давлению за компрессором:  
1 – выборка отклонений; 2 – тренд выборки;  
3, 4 – тренды относительно допусков;  
5 – заданные границы

## Литература

1. Епифанов, С. В. Синтез систем управления и диагностирования газотурбинных двигателей [Текст] / С. В. Епифанов, Б. И. Кузнецов, И. И. Богдаенко. – К. : Техніка, 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 [Текст] / 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 [Текст] / 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 [Текст] / 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 [Текст] / В. Ф. Миргород, Г. С. Ранченко, В. М. Кравченко // *Авиационно-космическая техника и технология*. – 2008. – № 9(56). – С. 192-197.
6. Миргород, В. Ф. Оптимальная аппроксимация трендовой компоненты временного ряда [Текст] / В. Ф. Миргород, И. М. Гвоздева // *Элек-*

*тротехнические и компьютерные системы*. – 2011. – № 04(80). – С. 121-125

7. Миргород, В. Ф. Трендовый анализ на основе диагностических параллелепипедов [Текст] / В. Ф. Миргород, И. М. Гвоздева // *Системні технології. Регіональний міжвузівський збірник наукових праць*. – Дніпропетровськ, 2012. – Вип. 3(80). – С. 97-104.

8. Миргород, В. Ф. Динамические характеристики системы измерения давления в контуре регулирования тк [Текст] / В. Ф. Миргород, В. М. Грудинкин // *Авиационно-космическая техника и технология*. – 2006. – № 8(34). – С. 42-45.

9. Миргород, В. Ф. Оценка достоверных интервалов трендовой компоненты временных рядов [Текст] / В. Ф. Миргород, Е. В. Деренг // *Авиационно-космическая техника и технология*. – 2014. – № 7 (114). – С. 175-180.

## References

1. Epifanov, S. V., Kuznecov, I. I., Bogaenko B. I. *Sintez sistem upravlenija i diagnostirovanija gazoturbinnih dvigatelej* [Synthesis of control and diagnostic system for gas turbine engine]. Kiev, Tehnika Publ., 1998. 312 p.
2. Eliseev, Ju. S., Dobrjanskij, G. V., Dema, T. F. *Statisticheskie metody formirovanija algoritmov vychislenija v polete tjagi i drugih osnovnyh parametrov gazoturbinnogo dvigatelja, kriteriev i priznakov tehničeskogo sostojanija ego uzlov* [Statistical methods for forming of calculation during flying and other Aerospace technic and technology, 2003, no. 6(41), pp. 81-89.
3. Mirgorod, V. F., Ranченко, G. S. *Sravnitel'nyj analiz metodov diagnostirovanija tehničeskogo sostojanija dvigatelja gazoturbinnogo privoda po dannym registracii* [Comparative analysis of diagnosing methods of gas-turbine engine drive technical state by data of registration]. *Aerospace technic and technology*, 2006, no. 2 (28), pp. 70-74.
4. Egorov I. V. *Diagnostirovanie tehničeskogo sostojanija aviacionnyh dvigatelej* [Diagnostic of aviation engines technical state]. *Trudy CIAM «Nauchnyj vklad v sozdanie aviacionnyh dvigatelej»* [Science investman aviation engine development]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 2000, pp. 651-688.
5. Mirgorod, V. F., Ranченко, G. S., Kravchenko, V. M. *Primenenie diagnosticheskikh modelej i metodov trendovogo analiza dlja ocenki tehničeskogo sostojanija gazoturbinnih dvigatelej* [Application of diagnostic models and trend analyze method for estimation gas turbine engine technical state]. *Aerospace technic and technology*, 2008, no. 9 (56), pp. 192-197.
6. Mirgorod, V. F., Gvozdeva, I. M. *Optimal'naja approksimacija trendovoj komponenty vremennogo rjada* [Optimal approximation of trend component of time series]. *Elektrotehnic and computing systems*, 2011, no. 04(80), pp. 121-125.

7. Mirgorod, V. F., Gvozdeva, I. M. Trendovij analiz na osnove diagnosticheskikh parallelepipedov [Trend analysis on the diagnostic parallelepiped base]. *System technologies. Regional scientific works collection*, 2012, no. 3(80), pp. 97-104.

8. Mirgorod, V. F., Grudinkin, V. F., Dinamicheskie harakteristiki sistemy izmerenija davlenija v konture regulirovanija  $\pi_k$  [Dynamic characteristics of

pressure measurement system in  $\pi_k$  regulation loop]. *Aerospace technic and technology*, 2006, no. 8(34), pp. 42-45.

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

*Поступила в редакцию 12.05.2016, рассмотрена на редколлегии 15.06.2016*

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

### ДОПУСКОВИЙ ТРЕНДОВИЙ КОНТРОЛЬ ТЕРМОГАЗОДИНАМІЧНИХ ПАРАМЕТРІВ СИЛОВИХ УСТАНОВОК

*В. Ф. Миргород, Є. В. Деренг*

Розглянуто задачу оцінки технічного стану газотурбінних двигунів силових установок авіаційного застосування по даним реєстрації термогазодинамічних параметрів в довготривалій експлуатації. Запропоновано підхід до отримання даних про технічний стан на основі виділення трендів відхилень від заданих дросельних характеристик і наступної їх оцінки відносно змінних на режимах полів допусків. Виконано тестування запропонованого підходу на прикладі ГТД маршевої двигунової установки. Встановлена можливість підвищення надійності оцінки технічного стану за рахунок сумісного аналізу трендів відхилень від полів допусків. Пропонується поліноміальна апроксимація границь допусків деформації дросельних характеристик. Розроблено програмно-алгоритмічне забезпечення для реалізації запропонованого підходу

**Ключові слова:** газотурбінний двигун, діагностики, діагностична модель, трендовий аналіз, допусківий контроль

### TOLERABLE TREND CONTROL OF POWER-PLANTS THERMOGASDYNAMIC PARAMETERS

*V. F. Mirgorog, E. V. Dereng*

The task of estimation of the technical state of power-plants turbo-engines for aviation application is considered by registration data of thermogasdynamical parameters in the continuous exploitation. Approach to receipt data about the technical state on the basis of selection of trends of deviations from the set choke descriptions and their subsequent estimation in relation to variables on the modes of the admittances fields is offered. Testing of offered approach is executed on the example of the march motive GTE. Possibility of reliability increase of technical state estimation at the expense of the joint analysis of deviations trends of from the fields of admittance is determined. Polynomial approximation of admittances scopes of choke characteristics deformation is offered. Soft ware is developed for realization offered approach.

**Keywords:** gas turbine engine, diagnostics, diagnostic model, trend analysis, tolerable control.

**Миргород Владимир Федорович** – д-р техн. наук, вед. науч. сотрудник АО «Элемент», Одесса, Украина, e-mail: mirgorod\_v@mail.ru.

**Деренг Евгения Владимировна** – аспирант, Институт проблем моделирования в энергетике им. Г. Е. Пухова, Киев, 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.

**Dereng Elena Vladimirovna** – Graduate student, Pukhov Institute for Modeling in Energy Engineering, Kiev, Ukraine, e-mail: odessa@element.od.ua.