

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

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ДЕФОРМАЦИИ ДРОССЕЛЬНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ГАЗОТУРБИННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ В ДЛИТЕЛЬНОЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ

*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, запас газодинамической устойчивости.

### Введение

Проблема перевода силовых установок (СУ) на основе газотурбинных двигателей (ГТД), на стратегию эксплуатации по техническому состоянию (ТС), поставленная еще в начале века, в настоящее время еще далека от своего решения как за рубежом, так и в отрасли национального газотурбостроения. Даже в нормативных документах, в частности ISO 3977-9:1999 Gas turbines, нормы, регламентирующие мониторинг ТС, имеют лишь рекомендательный характер (п.4.4.1 «Контроль (мониторинг) состояния: По требованию заказчика изготовитель может предоставить систему мониторинга технического состояния, позволяющую детально отслеживать необходимую информацию; периодичность мониторинга; методы обработки информации, прогноза и/или диагностики возможных отказов, ухудшения характеристик или необходимости в ТО (например, трендовый анализ)». Существенная затратность внедрения эксплуатации по ТС сдерживает ее реализацию, как и ряд других причин технологического и организационного характера. Одной из таких причин, на наш взгляд, является неочевидность связи с безопасностью полетов, поэтому вопросы эксплуатации по ТС не нашли еще должного отображения в АП. Один из факторов, влияющих на безопасность полетов, является критическое снижение запасов ГДУ вследствие деградации дроссельных

характеристик (ДЧ) в процессе эксплуатации ГТД. Поэтому важной научно-практической задачей является установление связи между изменениями ДЧ в процессе эксплуатации ГТД и изменением запасов его ГДУ.

### 1. Формулирование проблемы

Применению методов прикладной статистики к анализу временных рядов, образованных параметрами регистрации ТСГТД, посвящено значительное число публикаций [1,2,3]. Фундаментальные основы методов трендового контроля, применительно к БСКД, изложены в монографии [1] и ряде диссертационных исследований школы проф. Епифанова С.В. (ХАИ).

Значительный вклад в развитие таких методов на основе построения диагностических моделей внесли работы Егорова И.В. (ЦИАМ) [4]. Для решения поставленных задач, в работах проф. Добрянского В.Г. и его учеников развиваются методы нелинейного регрессионного анализа. Предлагаемые методики диагностирования ТС являются весьма совершенными, в частности, учитывают индивидуальные характеристики конкретного экземпляра ГТД, и уже нашли отражение в РЭ для СУ наземного применения. Следуя [4] и [5,6,7], окончательное решение по диагностической ситуации рекомендуется принимать по диаграмме совместных трендов.

Целью работы является построение эмпирической модели, связывающей деградацию ДЧ ГТД в процессе эксплуатации с изменением запасов его ГДУ.

### 2. Решение проблемы

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

Предметом настоящего исследования являются математические модели связывающей деградацию ДЧ ГТД в процессе эксплуатации с изменением запасов его ГДУ.

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 характера остаточных отклонений после выделения трендов.

Существенными особенностями предлагаемой в данной работе методики является тот факт, что для конкретизации результатов трендового анализа рассматривается тренд отклонений от ДХ, который затем переносится на ее плоскость для установления факта и характера деформаций.

На следующем этапе деформация ДХ отображается на характеристики КВД для установления факта и характера снижения запасов ГДУ.

Предлагаемая информационная технология заключается в следующем:

- формируются выборки (временные ряды) исследуемых параметров ГТД (обороты турбин, давление за компрессором), и параметров внешних условий (температура и давление на входе) на стационарных режимах (взлет, МКР и т.д.);

- выполняется приведение термогазодинамических параметров (ТГДП) ГТД к стандартным атмосферным условиям: давление и температура заторможенного потока на входе  $T_{bx}$ ,  $P_{bx}$ , и в результате образуются вектор временных рядов приведенных параметров ГТД:  $\vec{y}_{tr}$ .

- 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.)  $\vec{y}^n(s, T_{bx}, P_{bx})$ .

- если информация о ДХ отсутствует, такие данные следует получить путем полиномиальной аппроксимации искомых зависимостей непосредственно по данным измерений.

- в результате должны быть получены временные ряды отклонений ТГДП от диагностической модели (ДМ) нормального состояния ГТД:

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

- получаемые временные ряды отклонений от ДМ подвергаются скалярному или многомерному трендовому анализу согласно [6,7,8].

- выделенные по группам полетных циклов участки трендов переносятся на плоскость ДХ.

- деформация ДХ отображается на характеристику КВД и выполняется оценка изменения запасов ГДУ.

Идея настоящего исследования состоит в том, что первоначально формируется тренд отклонений степени повышения давления от ДХ (рис. 1), который затем переносится на ее плоскость, аппроксимируется семейством зависимостей [9] по группам полетных циклов или наработке (рис. 2). Исследуемый двигатель регулировался по оборотам ТВД. Данные приведены для взлетного режима.

Типовая характеристика высоконапорного КВД [10] представлена на рис.3.

Результат отображения деформации ДХ в процессе эксплуатации ГТД на характеристику КВД приведен на рис.4. Там же приведены линии GDU запасов ГДУ в начале и на финишном участке эксплуатации и линия LRR рабочих режимов.

Типовые характеристики КВД подвергались полиномиальной аппроксимации и конформному преобразованию для получения промежуточных характеристик по оборотам ТВД.

Как это следует из результатов анализа и приведенных иллюстраций, смещение ДХ двигателя в процессе эксплуатации по степени повышения давления приводит к смещению и деформации напорных веток КВД в направлении уменьшения запасов ГДУ при поддержании неизменными оборотов турбины высокого давления. Анализ выполнен для взлетного, крейсерского режимов и режима 0,5 МКР.

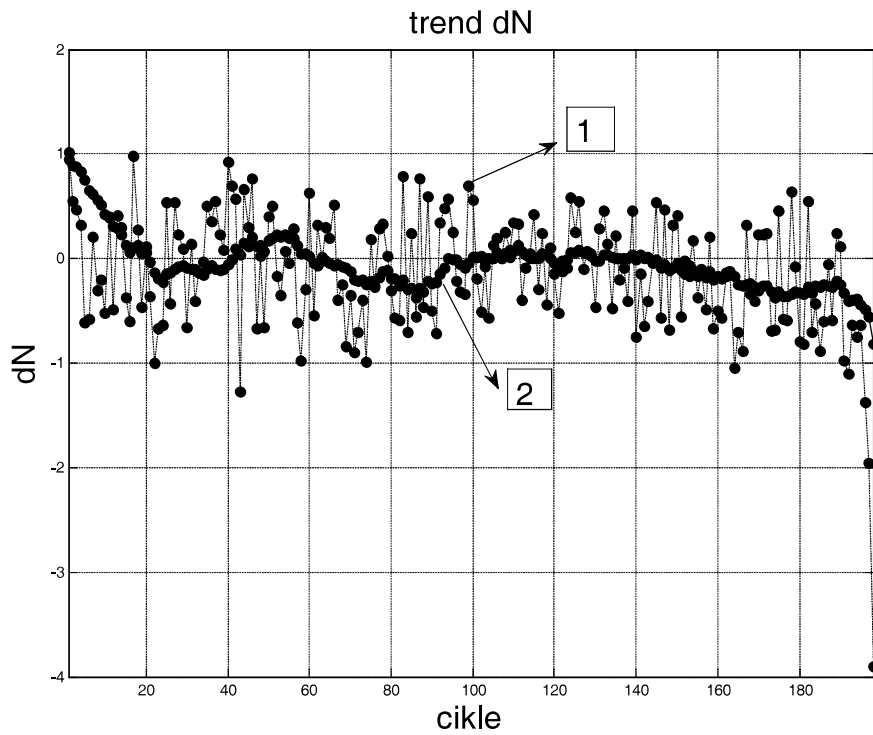


Рис. 1. Выборка отклонений степени повышения давления от ДХ – 1 и ее тренд – 2

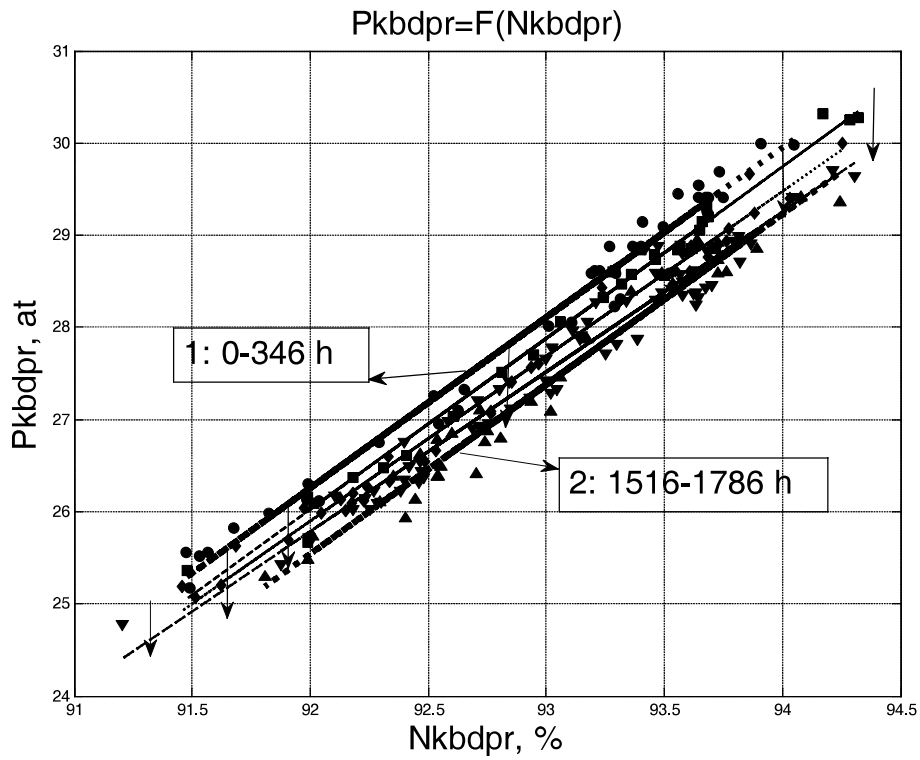


Рис. 2. Деформация (смещение) номинальной ДХ в процессе эксплуатации ГТД: 1 – начальный период эксплуатации (0-346) часов наработки, 2 – финишный период (1516-1746) часов наработки

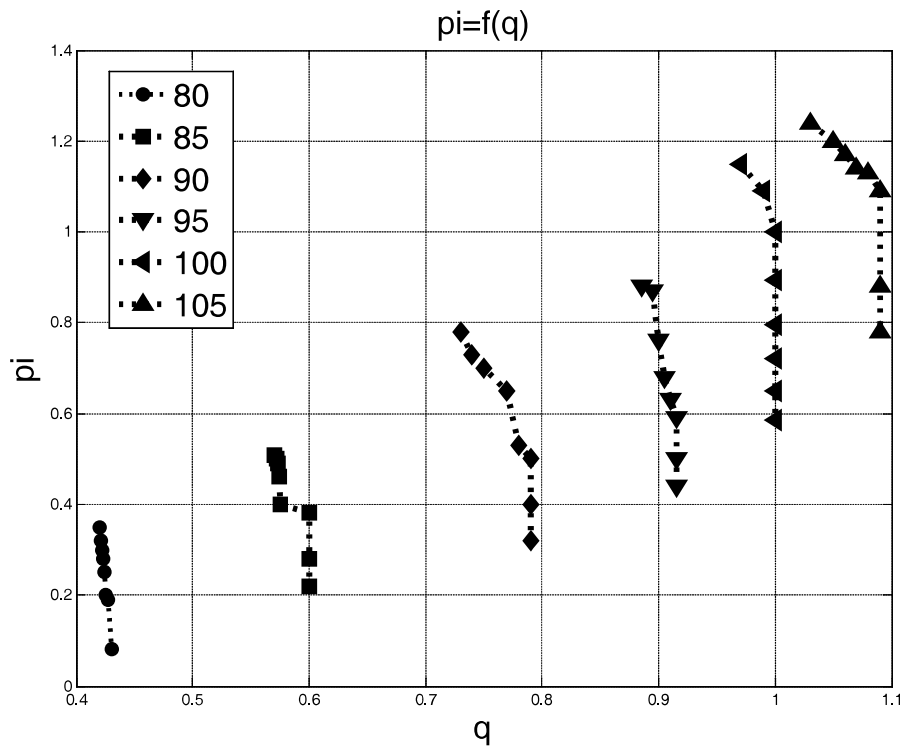


Рис. 3. Типовая характеристика компрессора высоко давления

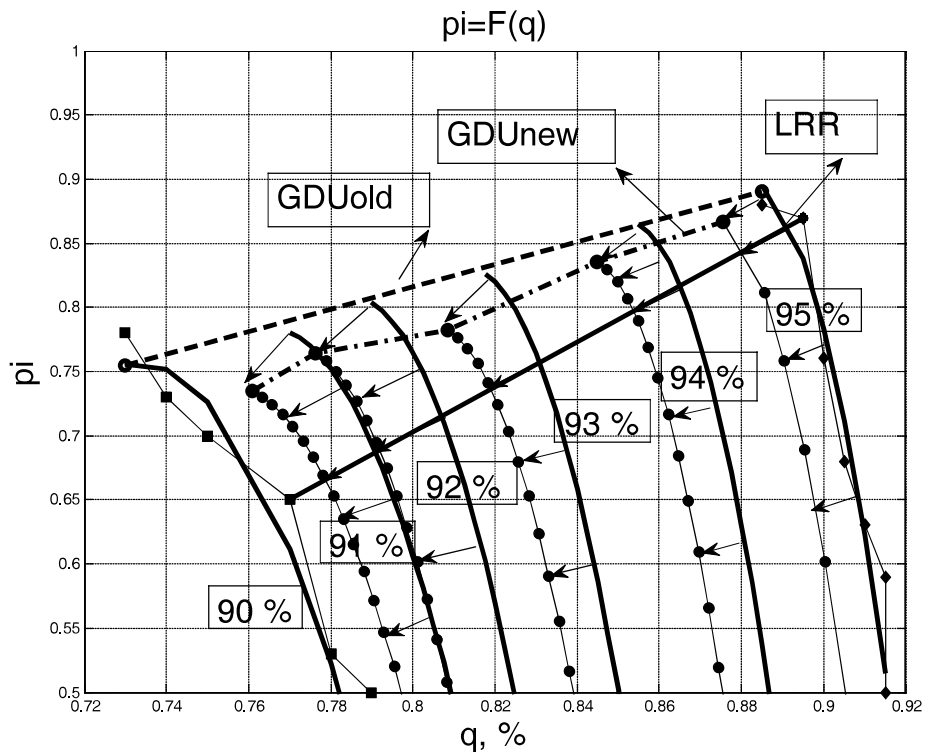


Рис. 4. Результат отображения деформации ДХ в процессе эксплуатации ГТД на характеристику КВД

**Заключение**

Предлагаемый подход к построению математической модели, связывающей деградацию ДХ ГТД в процессе эксплуатации с изменением запасов его ГДУ, позволяет расширить возможности адекватной оценки технического состояния двигателя в длительной эксплуатации. Такой подход реализуется на основе формирования взаимозависимостей параметров ГТД и их полиномиальной аппроксимации, построению трендов отклонений относительно ДХ и анализу деформации характеристик КВД.

Перспективы дальнейших исследований заключаются в разработке модификации предлагаемого подхода для турбовальных двигателей.

**Литература**

1. Епифанов С.В. Синтез систем управления и диагностирования газотурбинных двигателей [Текст] / С.В. Епифанов, Б.И. Кузнецов, И.И. Богаенко; – 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. Дем // 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] // 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. – 9(56) – 2008. – С. 192-197.

6. Миргород В.Ф. Оптимальная аппроксимация трендовой компоненты временного ряда [Текст] / В.Ф. Миргород, И.М. Гвоздева // Електротехнічні та комп'ютерні системи.– 2011. – №04(80).– С. 121-125.

7. Миргород В.Ф. Трендовый анализ на основе диагностических параллелепипедов [Текст] / В.Ф. Миргород, И.М. Гвоздева [Текст] // 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  $\pi_k$  [Текст] / Миргород В.Ф., Грудинкин В.М. // Авиационно-космическая техника и технология.– 2006. – №8(34) – С. 42-45.

9. Бочкарев С.К. Автоматизированное восстановление характеристик ГТД по экспериментальным данным [Текст] / С.К. Бочкарев, В.В. Мосулин // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета. – 2008. – №1 – С. 40-44.

10. Шулекин В.Т. Пособие по газодинамическому расчету двухконтурных турбореактивных двигателей ВС ГА по дисциплине «Термодинамика, теплопередача и теория АД» / В.Т. Шулекин, Н.Д. Тихонов. – М.: МГТУ ГА, 1999. –158 с.

Поступила в редакцию 14.06.2017 г.

**В.Ф. Миргород, Є.В. Деренг. Моделювання процесу деформації дросельних характеристик газотурбінних двигунів у тривалій експлуатації**

*Розглянуто завдання оцінки технічного стану газотурбінних двигунів силових установок авіаційного застосування за даними реєстрації термогазодинамічних параметрів в тривалій експлуатації. Запропонований 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 маршової рухової установки. Встановлена можливість підвищення надійності оцінки технічного стану за рахунок спільного аналізу трендів відхилень від полів допусків. Пропонується поліноміальна апроксимація меж допусків деформації дросельних характеристик. Розроблено програмно-алгоритмічне забезпечення для реалізації запропонованого підходу.*

**Ключові слова:** газотурбінний двигун, діагностики, діагностична модель, трендовий аналіз, запас газодинамічної стійкості.

**V.M. Mirgorod, E.V. Dereng. Modeling of the process of deformation of throttle characteristics of gas turbine engines in long-term operation**

*The problem of an estimation of a technical state of gas turbine engines for aviation application according to registration data of thermogasdynamic parameters during long-term operation is considered. An approach is proposed for to obtaining data on the technical state on the basis of selections trends deviations from the specified throttle characteristics and their subsequent evaluation with respect to the variables at the modes of the tolerance fields. The proposed approach was tested, using the example of the turbine engine. The possibility of reliability improving of the technical State assessment through joint analysis of deviations trends from tolerance fields is established. A polynomial approximation of the tolerances limits of throttling characteristics deformation of the is proposed. The software and algorithmic support for the implementation of the proposed approach is developed*

**Keywords:** turbo-engine, diagnosticians, diagnostic model, трендовый analysis, supply of gas-dynamic stability.