

УДК 629.7:621.3

А.М. ПАШАЕВ, М.Г. ШАХТАХТИНСКИЙ, П.Ш. АБДУЛЛАЕВ, А.ДЖ. МИРЗОЕВ

*Национальная Академия Авиации, Баку, Азербайджан***СИСТЕМА ДИАГНОСТИРОВАНИЯ АВИАЦИОННОГО ГТД  
С ПРИМЕНЕНИЕМ МЕТОДОВ SOFT COMPUTING**

*Предложена автоматизированная система диагностирования технического состояния авиационных газотурбинных двигателей, основанная на комплексном анализе термодинамических и механических параметров работы двигателя с применением различных методов. Рассмотрены основные этапы формирования нейро-статистической подсистемы предложенной автоматизированной системы диагностирования технического состояния авиационных газотурбинных двигателей. Предложенный алгоритм обработки полетной информации АГТД проходит успешную экспериментальную реализацию на двигателях ПС-90-76SW, Д30КУ-154, RB-211-534E и PW127 и рекомендуется к применению в технической эксплуатации вышеприведенных двигателей*

**Ключевые слова:** авиационный газотурбинный двигатель, техническое состояние, автоматизированная система диагностирования, математическая статистика, нейронная сеть.

**Введение**

Исследования в области создания автоматизированных систем диагностирования технического состояния (ТС) авиационных газотурбинных двигателей (АГТД) показывают на недостаточную обоснованность применения систем, основанных только на одном из известных методов диагностирования, так как ни один из методов не является универсальным и абсолютно надежным [1].

Естественно, что подобные системы диагностирования, построенные на основе одного классификатора, не смогут в полной мере удовлетворить возрастающие требования, предъявляемые к диагностированию двигателей, как в онлайн-режиме (в режиме реального времени), так и в офлайн-режиме.

Анализ последних исследований [2] показывает, что системы диагностирования технического состояния авиационных газотурбинных двигателей, базирующиеся на комбинации различных методов, еще мало изучены и требуют тщательных исследований.

Учитывая вышеприведенный анализ существующих работ, назрела острая необходимость в создании и применении комплексного подхода, с использованием новой технологии Soft Computing, при диагностировании ТС авиационных газотурбинных двигателей с использованием нечеткой логики и нейросетевых методов.

Применение данного подхода требует устойчивого и эффективного использования ресурсов современной информационной технологии.

**Результаты исследований**

Предлагаемая комплексная система основана на Комплексном Анализе термодинамических и механических параметров работы АГТД с применением различных методов, приведенных на рис. 1. При этом методы Soft Computing применяются как в отдельности, так и в комбинации с другими методами (например, M1 + M2 + КА и т.п., см. рис. 1, «+» - условный знак комбинирование), что позволяют производить поэтапную оценку ТС АГТД.

Рассмотрим подсистему диагностирования с использованием алгоритма M2 + M5 + КА (рис. 2). Для реализации рассматриваемой подсистемы диагностирования АГТД проанализируем отдельные этапы ее формирования.

Процесс диагностирования двигателя, в начале эксплуатации, заключается в оценке состояния АГТД на основе статической НС с прямым распространением сигнала, путем обучения последнего имплантированным банком неисправностей однотипных двигателей (первый этап).

При этом источником формирования имплантированных неисправностей двигателя являются результаты численных экспериментов с применением нелинейной полуэмпирической Математической Модели двигателя и модели двигателя полученной на основе множественного регрессионного анализа параметров [3]. Несмотря на грубую идентификацию ТС АГТД, преимуществом данного этапа является возможность формирования первоначального «портрета» двигателя на раннем этапе его эксплуатации.

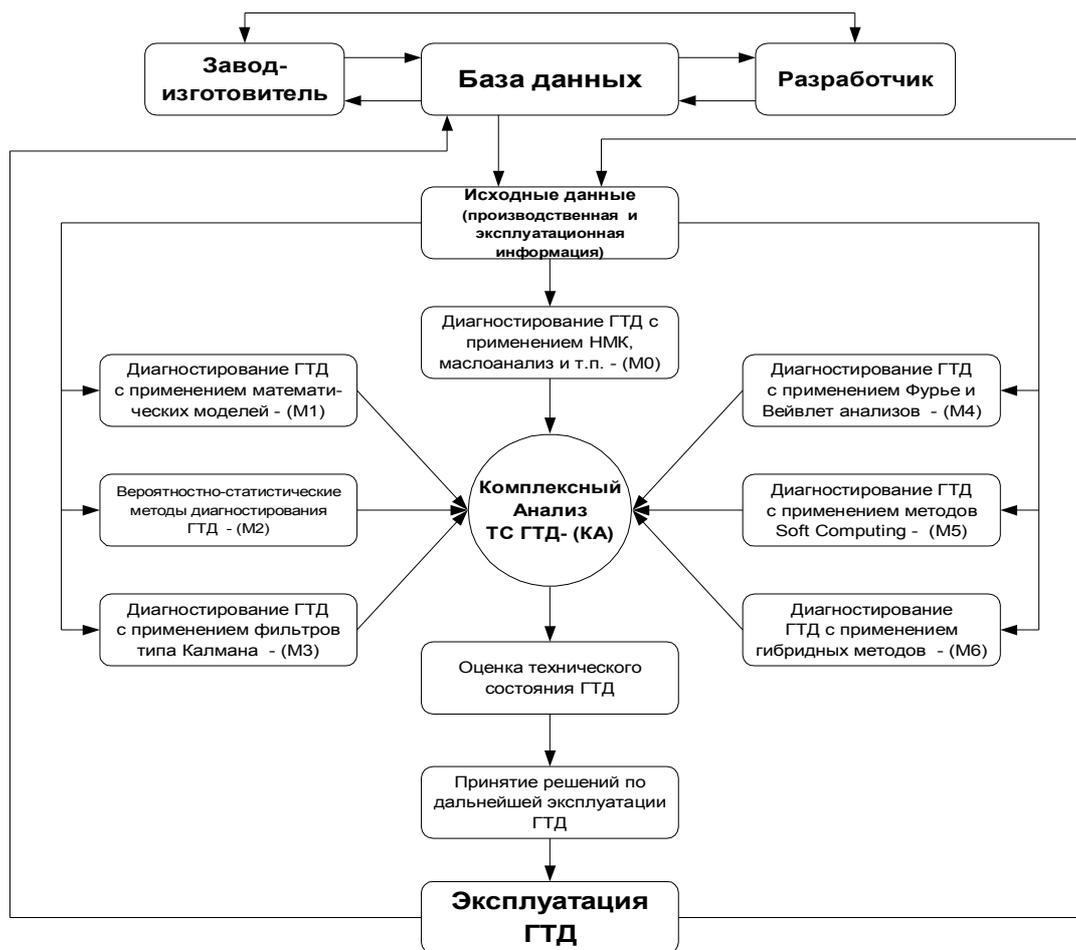


Рис. 1. Структура комплексной системы параметрического диагностирования авиационного ГТД

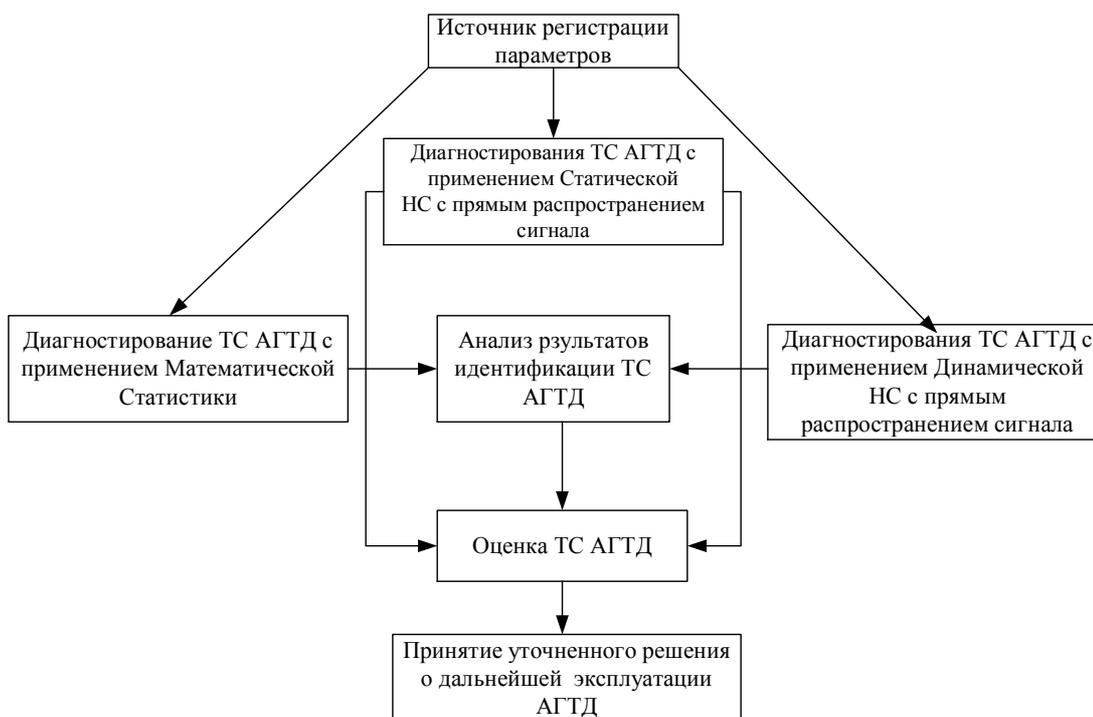


Рис. 2. Нейро-статическая подсистема диагностирования ТС АГТД (M2 + M5 + КА)

На втором этапе рассматриваемой подсистемы диагностирования ТС АГТД анализируется наличие развития неисправности двигателя на основе нейростатистической обработки параметров двигателя. При этом статистическая идентификация состояния двигателя начинается с  $N = 60$ -го измерения, что соответствует подчинению накопленных значений регистрируемых параметров АГТД к нормальному закону распределения [1].

Статистический подход обнаружения развития неисправности двигателя основывается на формировании гибких диапазонов регистрируемых параметров и сравнении их значений с расчетными верхними и нижними границами изменений:

$$P_n^B = \bar{P}_n + K_{1,n} \sqrt{S_n^2};$$

$$P_n^H = \bar{P}_n - K_{1,n} \sqrt{S_n^2},$$

где  $\bar{P}_n$  и  $S_n$  – среднее значение и среднеквадратичное отклонение параметров двигателей;

$K_{1,n}$  – толерантный коэффициент, зависящий от числа измерений  $n$ , принятого уровня значимости и доверительной вероятности.

Нейросетевой подход выявления неисправности базируется на формировании верхнего и нижнего порогов выходного (диагностируемого) параметра нейросетевой модели (НМ) двигателя соответствующие началу необратимого состояния АГТД. При этом выходной (диагностируемый) параметр НМ двигателя уточняется на основе анализа динамики изменения основных характеристик распределений параметров ( $A(P_i)$  и  $E(P_i)$ ), которые позволяют сформировать пороги необратимого неисправного состояния двигателя по формулам:

$$U_{\Pi}^B = P_n + \gamma_B, \quad \gamma_B = P_6 \alpha_1;$$

$$U_{\Pi}^H = P_n + \gamma_H, \quad \gamma_H = P_6 \alpha_2,$$

где  $P_n$  – значение выходного параметра последнего замера;

$P_6$  – базовое значение выходного параметра, определяемое как среднearифметическое за три последовательных замера;

$\alpha_1 = 0,5 \div 0,6$  и  $\alpha_2 = 0,1 \div 0,2$  – коэффициенты, полученные на основе экспериментальных исследований неисправностей двигателей.

По результатам синтеза анализов нейростатистического выявления развития неисправности двигателя выдается предупредительная рекомендация первого уровня о ТС АГТД.

Завершающим этапом рассматриваемой подсистемы диагностирования ТС АГТД является при-

нятие решения о текущем состоянии двигателя по результатам предполагаемого (ожидаемого) и имплантированного подходов идентификации двигателя. Проверка гипотезы базируется на сравнительном анализе комбинаций результатов предполагаемого (ожидаемого) и имплантированного подходов оценки узла неисправности двигателя с помощью логической модели блока принятия решений. При совпадении результатов предполагаемой и имплантированной локализации узла двигателя, логическая модель имеет простую структуру, в противном случае за базовое решение принимается результат предполагаемой локализации, а узел, соответствующий результату имплантированной идентификации, берется под особый контроль и без проведения наземного углубленного анализа АГТД к дальнейшей эксплуатации не допускается.

## Вывод

Предложенный алгоритм обработки полетной информации АГТД позволяет сформировать легко адаптируемую, для различных конфигураций средств регистрации и типов двигателя, автоматизированную систему диагностирования ТС АГТД, которая проходит успешную экспериментальную реализацию на двигателях ПС-90-76SW, Д30КУ-154, RB-211-534E и PW127 и рекомендуется к применению в технической эксплуатации вышеприведенных двигателей [1, 2].

## Литература

1. *Application Of Soft Computing Methods In Complex Condition Monitoring System For Aviation Gas Turbine Engines / M.G. Shaxtatskiy, P.S. Abdullayev, A.C. Mirzoyev, A.S. Yakushenko, V.N. Oxmakevich // Матеріали 8 міжнародної науково-технічної конференції "АВІА - 2007". – К.: НАУ, 2007. – Т. 2. – С. 31.14-31.17.*
2. *Мирзоев А.Д. Комплексная система диагностирования авиационных газотурбинных двигателей / А.Д. Мирзоев // Авиационно-космическая техника и технология. – Х.: НАКУ «ХАИ», 2007. – № 6 (42). – С. 47-59.*
3. *Мирзоев А.Д. Применение методов Soft Computing в комплексной системе диагностирования авиационных ГТД / А.Д. Мирзоев // XV Тулолевские чтения: Международная молодёжная научная конференция, 9-10 ноября 2007 года: Материалы конференции. – Казань: Казанский государственный технический университет, 2007. – Т. I. – С. 347-350.*

Поступила в редакцию 29.05.2009

Рецензент: д-р техн. наук, проф. С.В. Епифанов, Национальний аерокосмічний університет ім. Н.Е. Жуковського «ХАІ», Харків, Україна.

### СИСТЕМА ДІАГНОСТУВАННЯ АВІАЦІЙНОГО ГТД З ЗАСТОСУВАННЯМ МЕТОДІВ SOFT COMPUTING

*А.М. Пашаев, М.Г. Шахтактинский, П.Ш. Абдуллаев, А. Дж. Мирзоев*

Запропоновано автоматизовану систему діагностування технічного стану авіаційних газотурбінних двигунів, заснована на комплексному аналізі термогазодинамічних і механічних параметрів роботи двигуна з застосуванням різних методів. Розглянуто основні етапи формування нейро-статистичної підсистеми запропонованої автоматизованої системи діагностування технічного стану авіаційних газотурбінних двигунів. Запропонований алгоритм обробки польотної інформації АГТД проходить успішну експериментальну реалізацію на двигунах ПС-90-76SW, Д30КУ-154, RB-211-534E і PW127 і рекомендується к застосуванню в технічній експлуатації вищенаведених двигунів.

**Ключові слова:** авіаційний газотурбінний двигун, технічний стан, автоматизована система діагностування, математична статистика, нейронна мережа.

### AVIATION GAS TURBINE ENGINE TECHNICAL CONDITION MONITORING USING THE SOFT COMPUTING METHODS

*A.M. Pashayev, M.G. Shaxtaxinskiy, P.S. Abdullayev, A.J. Mirzoyev*

The automatized Aviation Gas Turbine Engine monitoring system, based on the complex analysis of engine thermogasdynamic and mechanical parameters, was presented. The neural network and statistical subsystems' main forming stages was considered. The suggested stage of engine parameters monitoring has successfully experimental results for the engines PS90-76SW, D30KU-154, RB-211-534E4 and PW127 and recommend for above mention engines technical exploitation.

**Keywords:** aviation gas turbine engine, technical condition, automatized monitoring system, mathematical statistic, neural network.

**Пашаев Ариф Мир-Джалал оглы** – д-р физ.-мат. наук, академик, ректор, Национальная Академия Авиации, Баку, Азербайджан, e-mail: amirzoyev@swt.az.

**Шахтактинский Мамедамин Габидулла оглы** – д-р физ.-мат. наук, академик, советник ректора по научно-исследовательским делам, Национальная Академия Авиации, Баку, Азербайджан, e-mail: amirzoyev@swt.az.

**Абдуллаев Парвиз Шахмурад оглы** – канд. техн. наук, доцент, зав. кафедрой «Конструкция и эксплуатация ЛА и АД», Национальная Академия Авиации, Баку, Азербайджан, e-mail: a\_parviz@azeronline.com.

**Мирзоев Азер Джаваншир оглы** – аспирант, преподаватель кафедры в НАА и Инженер-двигателест в компании Silk Way Technics, Национальная Академия Авиации, Баку, Азербайджан, e-mail: azermirzoyev@mail.ru, amirzoyev@swt.az.