

УДК 629.7.03.004.64

Р.А. САДЫХОВ, П.Ш. АБДУЛЛАЕВ, А.Д. МИРЗОЕВ

Национальная академия авиации, Азербайджан, Баку

ОЦЕНКА ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ АВИАЦИОННОГО ГАЗОТУРБИННОГО ДВИГАТЕЛЯ С ПРИМЕНЕНИЕМ МЕТОДОВ SOFT COMPUTING

Предложена автоматизированная система диагностирования технического состояния авиационных газотурбинных двигателей, основанная на комплексном анализе термогазодинамических 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. Приведены результаты экспериментов практической реализации предложенной методики на двигателях ПС-90-76SW, Д30КУ-154 и RB-211-534E.

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. 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 оффлайн-режиме [1].

Анализ последних исследований показывает, что системы диагностирования ТС АГТД, базирующиеся на комбинации различных методов, еще мало изучены и требуют тщательных исследований.

Цель и постановка задачи

Учитывая вышеприведенный анализ существующих работ, назрела острая необходимость в создании и применении комплексного подхода, с ис-

пользованием новой технологии Soft Computing, при диагностировании ТС АГТД с использованием Нечеткой Логике (НЛ) и Нейросетевых (НС) методов. Применение данного подхода требует устойчивого и эффективного использования ресурсов современной информационной технологии.

Предлагаемая АСД основана на Комплексном Анализе (КА) термогазодинамических 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 (например, $M1 + M2 + KA$ и т.п., «+» – условный знак комбинирования), что позволяют производить поэтапную оценку ТС АГТД. Рассмотрим подсистему диагностирования с использованием $M2 + M5 + KA$ (рис. 2). Для реализации рассматриваемой подсистемы диагностирования АГТД проанализируем отдельные этапы ее формирования.

1. Методика оценки ТС АГТД с помощью математической статистики и нейронной сети

Подсистема комплексной системы диагностирования $M2 + M5 + KA$ технического состояния

АГТД позволяет производить многоэтапную он-лайн и оффлайновую оценку состояния двигателя параметрами, зарегистрированными различными средствами.

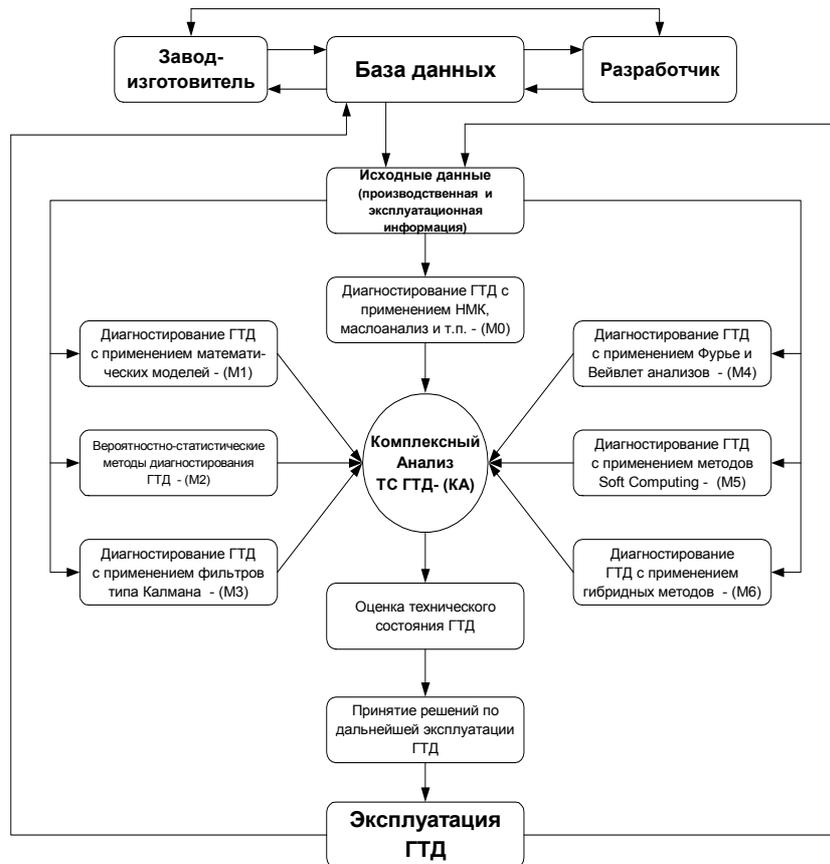


Рис. 1. Структура комплексной системы параметрического диагностирования авиационного ГТД

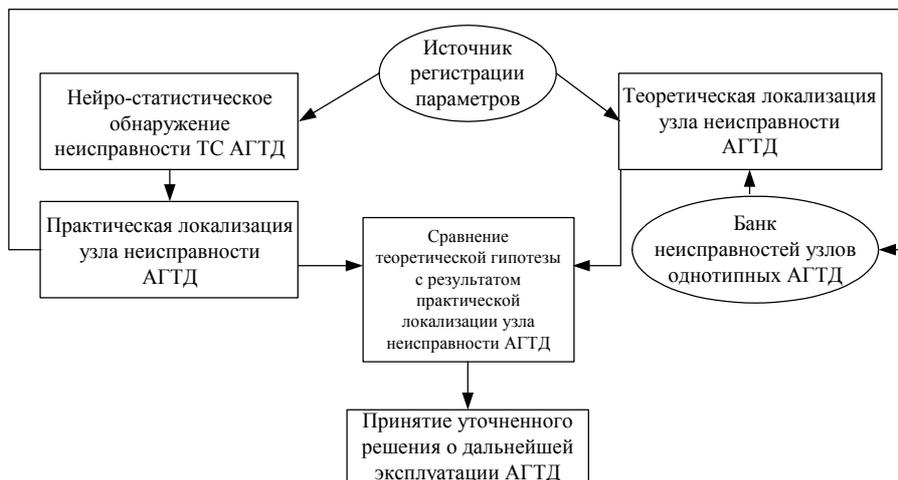


Рис. 2. Нейро-статическая подсистема диагностирования ТС АГТД ($M2 + M5 + KA$)

Первый этап предложенной комплексной системы диагностирования ТС АГТД позволяет выявить лишь тенденцию склонности двигателя к неисправному состоянию посредством нейростатистического подхода без локализации узла неисправности.

Статистическое обнаружение неисправности двигателя основывается на формировании гибких диапазонов регистрируемых параметров и сравнении их значений с расчетными верхними и нижними возможными границами, согласно формулам:

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

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

где \bar{P}_n и S_n – среднее значение и средне квадратичное 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.

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:

$$U_{II}^B = P_n + \gamma_B,$$

$$\gamma_B = P_0 * \alpha_1;$$

$$U_{II}^H = P_n + \gamma_H, \gamma_H = P_0 * \alpha_2,$$

где P_n – значение выходного параметра последнего замера;

P_0 – базовое значение выходного параметра, определяемое как среднеарифметическое за три последовательных замера;

$\alpha_1 = 0,5 \div 0,6$ и $\alpha_2 = 0,1 \div 0,2$ – коэффициенты, полученные на основе исследований неисправностей двигателей ПС-90А-76SW, Д30КУ-154 и RB211-534E4.

Необходимо отметить, что основные этапы формирования методики нейросетевого обнаружения склонности двигателя к неисправному состоянию базируются на сравнении характера поведений основных характеристик распределения выходного параметра НМ двигателя в течении четырех последовательных замеров.

При этом идентификация текущего состояния АГТД ведется по предварительно сформированным классами, уточненным на основе анализа результатов нейро-статистического выявления тенденции неисправностей двигателя. Каждому классу, в зависимости от диагностических ситуаций, соответствует код сообщений, содержания которых предписывает мероприятия, необходимые для проведения работ на двигателе. Рекомендация о дальнейшей эксплуатации АГТД выдается логической моделью блока принятия решений путем сравнений результатов нейросетевого и статистического анализа текущего состояния двигателя.

Локализация неисправности до узла, базирующаяся на практическом и теоретическом подходах, является вторым этапом предложенной комплексной системы диагностирования ТС АГТД.

При практическом подходе локализации узел неисправности АГТД определяется по таблице, сформированной на основе корреляционного и регрессионного анализов неисправностей двигателей. Для этого достаточно уточнить выходной (диагностируемый) параметр НМ двигателя и выявить степень интенсивности воздействующих на него параметров, характеризующих текущее состояние двигателя.

Формирование теоретического подхода локализации узла неисправности АГТД осуществляется идентификацией текущего состояния двигателя устойчиво обученной статической нейронной сети сгенерированными значениями параметров, которые характеризуют реальную неисправность двигателя. Реальным источником основного объема расчетных точек для обучения статической нейронной сети является банк значений параметров, характеризующие реальные неисправности однотипных двигателей, которые архивируются по мере эксплуатации парка двигателей.

Завершающим этапом предложенной комплексной оценки ТС АГТД является принятие уточненного решения о текущем состоянии двигателя путем

проверки теоретической гипотезы локализации узла неисправности. Проверка гипотезы базируется на сравнительном анализе комбинаций результатов практической и теоретической локализаций узла неисправности двигателя с помощью логической модели блока принятия решений.

При совпадении результатов теоретической и практической локализации, логическая модель имеет простую структуру, в противном случае за базовое решение принимается результат практической локализации, а узел, соответствующий результату теоретической идентификации, берется под особый контроль и без проведения наземного углубленного анализа двигатель к дальнейшей эксплуатации не допускается.

Практическая реализация рассматриваемой методики комплексной оценки ТС АГТД предписывает разработку и внедрение автоматизированной системы, основанной на соответствующем алгоритме обработки полетной информации [2]. Разработанный алгоритм обработки полетной информации, представленный в виде отдельных модулей позволяет сформировать быстро адаптируемую, для различных конфигураций средств регистрации и типов двигателей, автоматизированную систему оценки ТС АГТД.

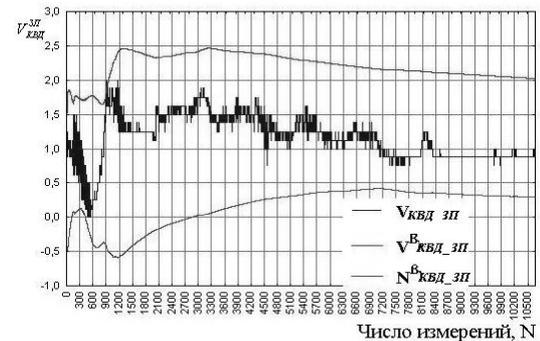
2. Эксперименты и результаты

Для экспериментальной проверки предложенной $M2+M5+KA$ системы комплексной оценки ТС АГТД были исследованы два реальных случая развития неисправности двигателей.

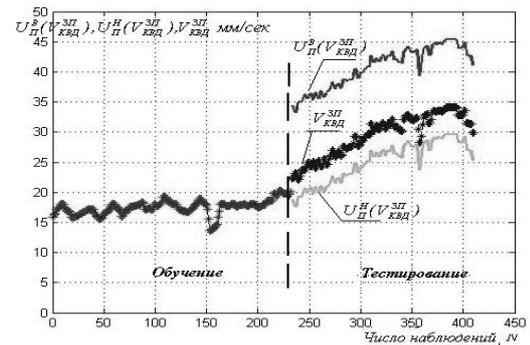
В первом случае, на двигателе ПС90А-76SW наблюдалось превышение допустимого значения виброскорости ротора компрессора высокого давления в зоне разделительного корпуса $V_{КВД}^{3П}$ на всех режимах полета с начала эксплуатации. Ряд мероприятий, проведенных на двигателе с целью выявления причины завышенной вибрации $V_{КВД}^{3П}$ и избежания

внеплановых простоев воздушного судна (ВС), не привело к удовлетворительным результатам.

Эффективность разработанной методики диагностирования ТС АГТД была подтверждена онлайн-исследованием полетной информации, зарегистрированной с помощью бортового накопителя РСМСИА карты и обработана согласно приведенной методики [3].



а



б

Рис. 3 Динамика изменения параметра $V_{КВД}^{3П}$ двигателя ПС90-76SW (статистический (а) и нейросетевой (б)): $V_{КВД_3П}^B$ и $N_{КВД_3П}^B$ – возможные верхние и нижние границы $V_{КВД_3П}^B$; $U_P^B(V_{КВД}^{3П})$ и $U_P^H(V_{КВД}^{3П})$ – верхний и нижний порог $V_{КВД}^{3П}$

Как видно из анализов результатов, приведенных на рис. 3 (а и б), комбинированный нейросетевой и статистический подходов позволили выявить склонность двигателя к неисправному состоянию по параметру – вибрация ротора $V_{КВД}^{3П}$ в начале полета осуществляющегося ВС из Баку в Багдад.

Дальнейшая обработка выходного параметра (диагностируемого) НМ двигателя, по методикам

практической и теоретической локализаций узла неисправности двигателя, выявила предполагаемую неисправность системы смазки и суфлирования двигателя ПС90А-76SW.

Записи причин снятия двигателя с эксплуатации, произведенные в формуляре двигателя ПС90А-76SW, подтверждают правильность определения адреса неисправности по разработанной методике.

Во втором случае, анализ иллюстрированных результатов (рис. 4, а и б) идентификации текущего состояния двигателя Д30КУ-154 позволили оценить состояние двигателя как неисправное по каналу предельной виброскорости задней опоры V_{30} с предположительным адресом дефекта – компрессор двигателя.

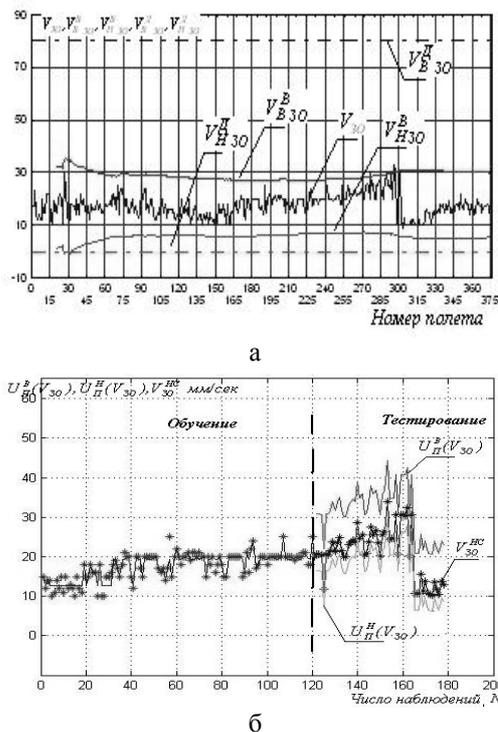


Рис. 4. Динамика изменения параметра V_{30} двигателя Д30КУ-154 (статистический (а) и нейросетевой (б)): $V_{B_30}^B, V_{H_30}^B, V_{B_30}^D, V_{H_30}^D$ – возможные и допустимые верхние и нижние границы; $U_{H}^B(V_{30}), U_{H}^D(V_{30})$ – верхний и нижний порог V_{30}

Осмотром проточной части была обнаружена забоина на рабочей лопатке 1-й ступени компрессора низкого давления.

Разработанная система диагностирования ТС АГТД проходит практическую реализацию на двигателе RB-211-534E, где были получены устойчивые результаты.

Вывод

Анализ приведенных результатов показывает не только на эффективность разработанной системы диагностирования ТС АГТД, но и на чувствительность системы к начальной стадии развития неисправности двигателя.

Реализация данного подхода диагностирования ТС АГТД требует автоматизированной системы диагностирования базирующаяся на различные средства регистрации полетной информации.

Литература

1. Application Of Soft Computing Methods In Complex Condition Monitoring System For Aviation Gas Turbine Engines / M.G. Shaxtaxtinskiy, P.S. Abdullayev, A.C. Mirzoyev, A.S. Yakushenko, V.N. Oxmakevich // Матеріали 8 міжнародної науково – технічної конференції “АВИА. – К.: НАУ. – 2007. – Т. 2. – С. 31.14-31.17.
2. Мирзоев А.Д. Комплексная система диагностирования авиационных газотурбинных двигателей // Авиационно-космическая техника и технология. – 2007. – № 6 (42). – С. 47-59.
3. Fuzzy Condition Monitoring System for Aviation Gas Turbine Engines / P.S. Abdullayev, A.M. Pashayev, R.A. Sadiqov, A.J. Mirzoyev // Proceeding of IMECE2007: ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition, November 11-15, 2007, Seattle, Washington, Paper IMECE2007-43902. – 14 p.

Поступила в редакцию 27.05.2008

Рецензент: д-р техн. наук, проф. Ю.М. Терещенко, Национальный авиационный университет, Киев.