

ПАРАМЕТРИЧЕСКАЯ ДИАГНОСТИКА И ОЦЕНКА СОСТОЯНИЯ ГАЗОТУРБИННЫХ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВОК С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ SCADA-ТЕХНОЛОГИЙ И ИМИТАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

А. В. Суханов¹, Д. А. Ахмедзянов²

¹andrew.sukhanov@mail.ru, ²ada@ugatu.ac.ru

ФГБОУ ВО «Уфимский государственный авиационный технический университет» (УГАТУ)

Поступила в редакцию 02.11.2021

Аннотация. Рассмотрено создание метода контроля состояния в эксплуатации газотурбинных двигателей и газотурбинных установок на их основе, а также способ автоматизации процесса испытаний и отладки изделий для повышения эффективности параметрической диагностики промышленных газотурбинных установок на базе авиационных ГТД на основе разработки автоматизированной системы диагностики и контроля испытаний. Обобщены результаты эксплуатации промышленных ГТУ и выявлены закономерности и взаимосвязи отказов с режимами эксплуатации и дефектами.

Ключевые слова: авиационные двигатели; параметрическая диагностика; автоматизация испытаний; SCADA-система; цифровой двойник.

ВВЕДЕНИЕ

В последнее десятилетие, особенно в последние 4–5 лет, в связи с реализацией государственной политики в области информационных технологий в различных отраслях народного хозяйства в рамках национальной программы «Цифровая экономика РФ» новый толчок получило развитие информационных технологий в области авиационного двигателестроения. В создании новых продуктов все активнее внедряются автоматизированные системы проектирования, производства, диагностики газотурбинных двигателей (ГТД). Вектор развития двигателестроительной отрасли страны направлен на рассмотрение возможности создания новых современных способов создания конкурентоспособных на мировом уровне продуктов как в военной, так и в гражданской сферах.

Одним из перспективных подходов с учетом сложившейся в отрасли ситуации, а также с учетом опыта зарубежных стран в области создания высокотехнологичной наукоемкой продукции является подход на базе цифровых двойников изделий.

Концепция цифрового двойника предполагает создание представления системы из двух систем, взаимодействующих друг с другом: физической системы и виртуальной, включающей всю информацию о физической системе. Ключевым моментом является постоянное взаимодействие этих систем через обратную связь (обмен информацией), что позволяет отображать состояние в реальном времени состояние физической системы в виртуальной и наоборот.

Такой подход в области двигателестроения открывает широкий спектр возможностей его применения, начиная с этапа проектирования изделия и заканчивая его утилизацией, охватывая весь жизненный цикл.

Согласно существующей концепции создания сложной наукоемкой продукции, к которой относится в том числе и ГТД, наибольший интерес представляет создание цифрового двойника на этапах, требующих наибольшего интеллектуального потенциала – этапах проектирования и доводки ГТД, а в процессе эксплуатации – диагностики неисправности в узлах ГТД. Причем особенный интерес представляет прогнозирование возникновения неисправностей либо отказов ГТД до их проявления на физическом объекте. Именно такую задачу и призван решить цифровой двойник в глобальном аспекте своего существования.

Суть современных параметрических систем диагностики, как правило, сводится к определению выхода какого-либо параметра ГТД или газотурбинной установки (ГТУ) за допустимые границы (уставки) [5]. При этом задача прогнозирования развития отклонения параметра внутри допустимого диапазона не рассматривается. Однако отклонение параметра (или комплекса параметров) может служить диагностическим признаком неисправности узла. Внедрение алгоритмов отслеживания и распознавания отклонения комплекса параметров в автоматизированную систему диагностики ГТД, ГТУ позволит существенно повысить их контролепригодность и увеличить срок эксплуатации.

Одним из решений может стать алгоритм диагностики, основанный на сравнении математической модели, уточняемой в ходе эксплуатации с реальным объектом и определении отклонений.

В настоящее время существует множество подходов к решению задач технической диагностики с использованием инструментария математического моделирования. В работе предлагается комбинированный авторский подход, основанный на использовании математических моделей, получающих информацию в режиме реального времени из SCADA-системы. Реализация подобного подхода возможна при интеграции системы имитационного моделирования (поэлементная динамическая модель) ГТД со SCADA-системой [1, 3].

Автоматизированная система диагностики (АСД) на основе интеграции SCADA-системы и системы имитационного моделирования может значительно сократить затраты в эксплуатации на содержание ГТУ и стать переходной ступенью для обслуживания ГТУ по техническому состоянию.

МЕТОДИКА ПАРАМЕТРИЧЕСКОЙ ДИАГНОСТИКИ И ОЦЕНКИ СОСТОЯНИЯ

При анализе существующего подхода к обработке результатов испытаний и эксплуатации ГТУ стоит отметить, что задача диагностирования отказов либо остановов не решается [4]. При выходе параметра из допустимого диапазона, как правило, принимается решение об останове привода, замены его на резервный, и принятия дальнейших шагов по дефектации и ремонту ГТУ.

В качестве примера на рис. 1 представлена типовая блок-схема оценки в эксплуатации промышленных ГТУ по параметрам мощности и КПД силовой установки, а на рис. 2 представлен алгоритм оценки состояния установки по комплексам газодинамических параметров.

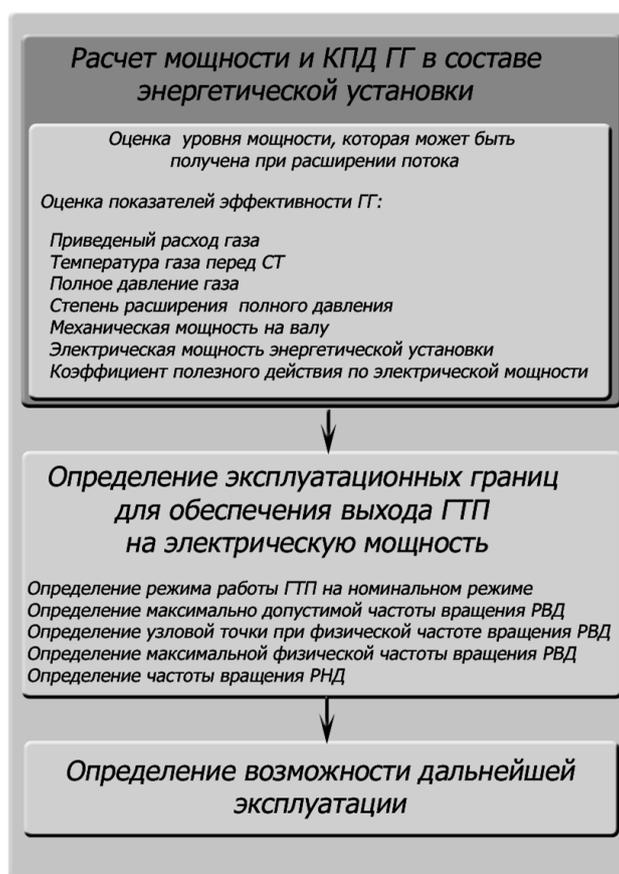


Рис. 1. Блок-схема типовой методики диагностики ГТУ по мощности и КПД

Как видно из представленных типовых алгоритмов работы существующих систем диагностики, вопрос оценки комплексов параметров для определения причины вероятного дефекта и даже, в общем случае, самого дефекта не рассматривается. задачей данных алгоритмов является оценка соблюдения параметром или комплексом параметров заданного «коридора» значений.



Рис. 2. Блок-схема типовой методики диагностики ГТУ по комплексу параметров

Выход того или иного параметра за границы «коридора» рассматривается на двух этапах. На первом этапе при приближении значения к границе коридора либо при небольшом его превышении автоматизированной системой диагностики выдается предупредительный сигнал, свидетельствующий о необходимости обращения внимания на контролируемый параметр. На втором этапе при резком или значительном превышении заданной уставки включается алгоритм аварийного останова установки.

Внедрение в типовые методики возможности прогнозирования развития отклонения параметра внутри допустимого диапазона способно значительно повлиять на количество аварийных остановов. Совершенствование регрессионной математической модели позволит, в пределе, решать задачу по определению дефектного узла путем набора статистики по результатам эксплуатации.

Структурно разработанная авторская методика определения состояния ГТД и ГТУ на их основе (рис. 3) содержит в своем составе 10 взаимосвязанных этапов, позволяющих структурировать информацию, полученную от объекта испытаний и получить рекомендации по устранению причин отказа или дефекта.

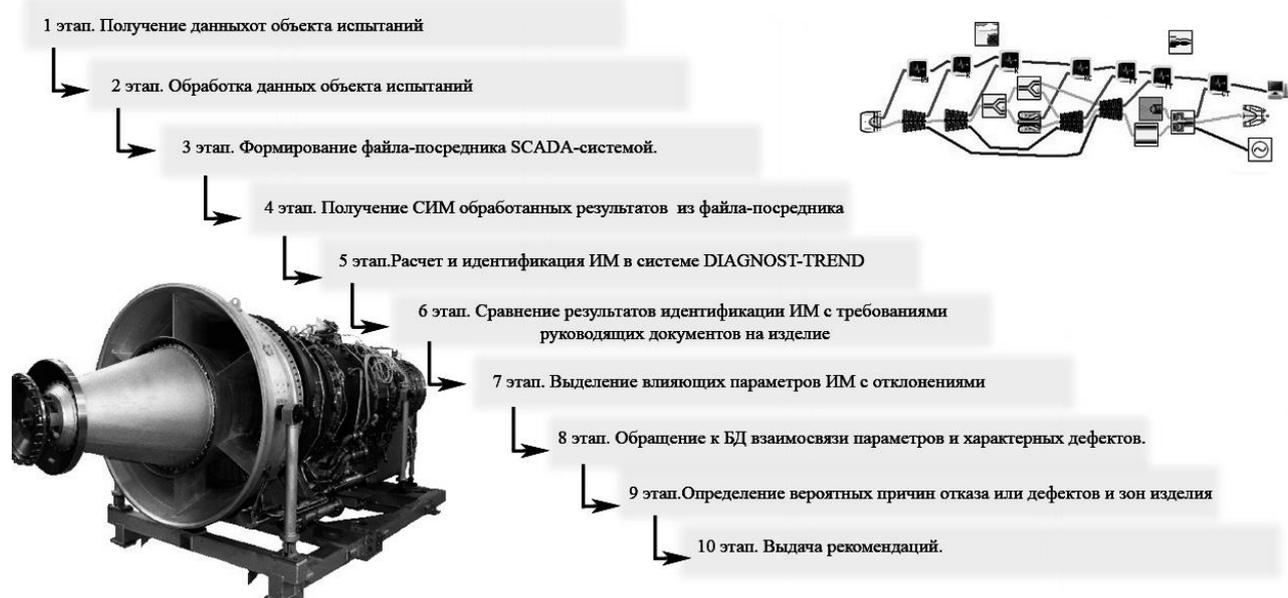


Рис. 3. Методика диагностирования газотурбинных установок на базе SCADA-технологий и имитационного моделирования

В общем случае действия по определению причины отказа или отклонения выполняются в следующей этапности.

Этап 1. Информация от первичных преобразователей, установленных на реальном физическом объекте поступает в SCADA-систему, где формируется первичный массив данных параметров объекта испытаний или объекта в эксплуатации.

Этап 2. Данные первичного массива данных параметров объекта структурируются и записываются SCADA-системой в файл для дальнейшей обработки и реструктурирования в файл-посредник, предназначенный для передачи массива данных в систему имитационного моделирования.

Этап 3. Реконфигурация данных в соответствии с топологией системы имитационного моделирования.

Этап 4. Получение системой имитационного моделирования параметров физического объекта (давление, температура, тяга и т.п.) из файла-посредника и формирование математической модели объекта по полученным данным.

Этап 5. Расчет и идентификация математической модели, определение реальных фактических значений характеристик узлов по термодинамическим параметрам, полученным в процессе работы изделия.

Этап 6. Формирование массива отклонений параметров объекта по расчетным характеристикам (отклонениям реальных параметров от заданных диапазонов).

Этап 7. Формирование комплексов отклонений параметров объекта испытаний, влияющих на состояние объекта испытаний в соответствии с конфигурацией базы данных экспертной системы программного комплекса DIAGNOST-TREND.

Этап 8. Сравнение показателей комплексов отклонений с комплексами отклонений базы данных экспертной системы, сопоставление и оценка возможности проявления дефекта в зависимости от количества совпадений во влияющих комплексах.

Этап 9. Выявление экспертной системой программного комплекса DIAGNOST-TREND вероятных причин отказа или дефекта и ранжирование причин в зависимости от количества совпадений диагностических признаков в базе данных экспертной системы.

Этап 10. Выдача рекомендаций по регулированию или выполнению регламентных действий в зависимости от выявленной причины дефекта или отказа.

Таким образом, рассмотренные этапы полностью охватывают спектр мероприятий по получению данных об объекте испытаний, их интерпретацию, формирование имитационной модели, ее идентификации. После идентификации имитационной модели происходит выделение характерных параметров и рассчитываются отклонения, которые сверяются с отклонениями, заданными в руководящей документации. При превышении отклонениями параметров допустимых пределов (на заданную величину) формируется комплекс «дефектных» параметров, который сравнивается с комплексом параметров, характеризующих конкретный дефект, который находится в базе данных. При полном соответствии выдается заключение о наличии конкретного вида дефекта в конкретном узле двигателя. При неполном соответствии выдается перечень дефектов с оценкой вероятности появления дефекта в конкретном узле.

Для верификации разработанной методики была разработана функциональная модель автоматизированной системы диагностики (рис. 4). Основные принципы функционирования системы основаны на базе современных представлений о функционировании системы в рамках концепции «Цифровой двойник». При работе системы возможно создание полной копии изделия в системе имитационного моделирования, либо в SCADA-системе с вшитой в нее математической моделью ГТД или ГТУ [2]. Взаимодействуя в процессе отладки и испытаний, по результатам идентификации типовой математической модели формируется индивидуальная математическая модель ГТД. Автоматизированная система диагностики, выполняя анализ параметров индивидуальной математической модели:

- в процессе отладки формирует рекомендации о настройках параметров агрегатов;
- в процессе испытаний контролирует соответствие параметров изделия нормам, заложенным в технологической и конструкторской документации;
- в процессе эксплуатации контролирует соответствие параметров изделия нормам конструкторской документации с учетом оценки комплекса параметров, характеризующих наиболее опасные и часто встречающиеся дефекты.

Основным преимуществом такого подхода является наличие индивидуальной математической модели изделия на всех этапах жизненного цикла от первых технологических испытаний до момента утилизации, который также может быть предсказан автоматизированной системой диагностики и определен, как совокупность параметров, при которых дальнейшая эксплуатация двигателя технически и экономически нецелесообразна.

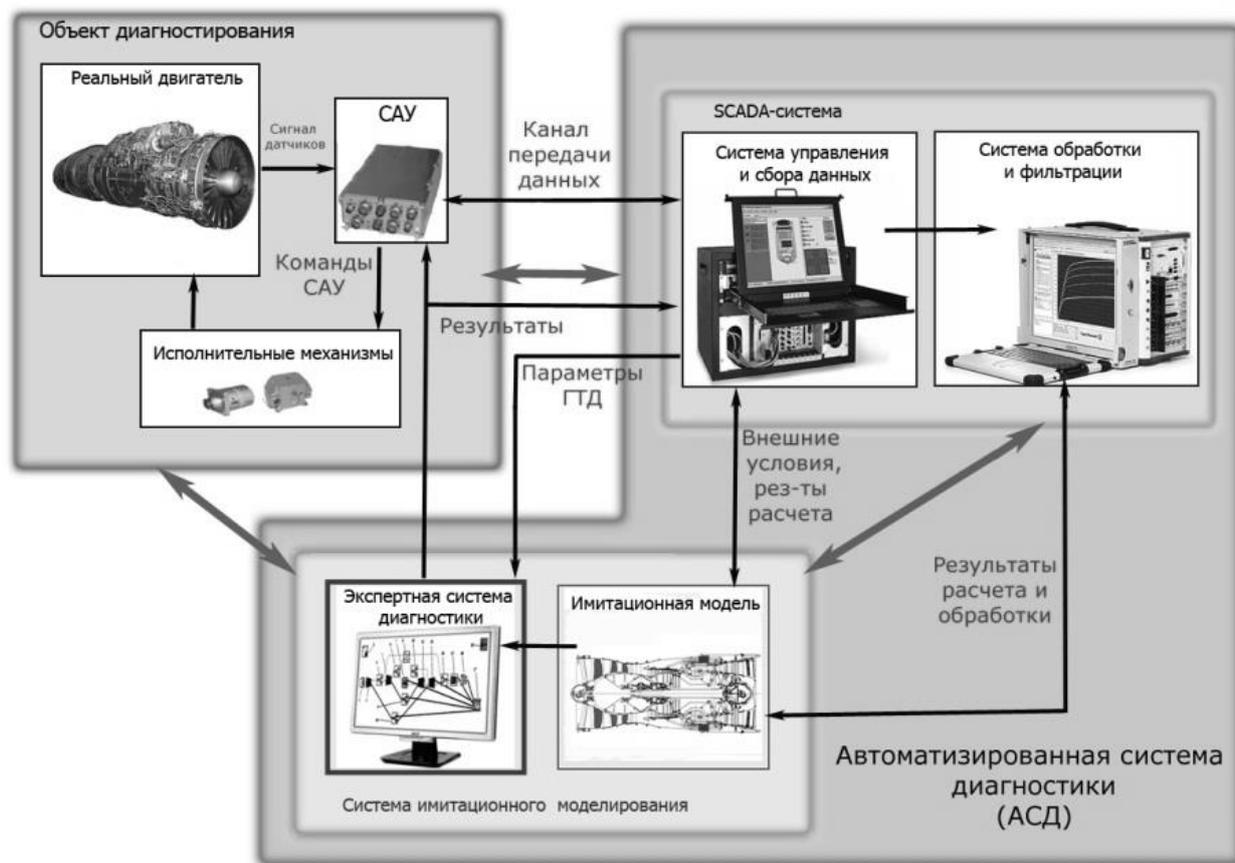


Рис. 4. Функциональная модель АСД [2]

Для отработки предложенной методики и функциональной модели АСД была разработана программа DIAGNOST-TREND. Программа содержит набор модулей с характеристиками узлов ГТУ, модули диагностики по узлам «Компрессор», «Камера сгорания», «Турбина», «Свободная турбина», а также модуль «Экспертная система», содержащий базу данных с комплексами отклонений характерных параметров и учетом взаимосвязи данных отклонений с дефектами в узлах ГТУ.

Каждый модуль программы выполняет расчет отклонений δ_{vxi} параметра в узле из комплекса параметров, характеризующих конкретный дефект.

$$\delta_{vxi} = \frac{\bar{x}_{vxi} - x_{0vxi}}{x_{0vxi}},$$

где δ_{vxi} – относительное отклонение параметра на входе в узел; x_{0vxi} – базовое (эталонное) значение параметра; \bar{x}_{vxi} – приведенное значение измеряемого параметра.

Так, для узла «Компрессор» рассчитываются величины отклонений по параметрам: степень повышения давления в компрессоре π_k , температура газа за турбиной T_4 , температура газов свободной турбины T_5 , мощность компрессора N_k , мощность турбины N_T , расход воздуха G_B , отношения частоты вращения ротора низкого давления к частоте вращения ротора высокого давления N_1/N_2 которые характеризуют дефекты «Загрязнение ГВТ», «Обрыв лопатки компрессора», «Попадание предмета на вход ГТД», «Помпаж».

Для узла «Камера сгорания» выполняется расчет отклонений по параметрам: температура газа за турбиной T_4 , температура газов свободной турбины T_5 , и расход топлива G_T , которые характеризуют дефекты «Прогар жаровой трубы», «Течь в топливной системе», «Закоксовывание форсунок».

Для узла «Турбина» рассчитываются величины отклонений по параметрам: частота вращения ротора низкого давления N_1 , частота вращения ротора высокого давления N_2 , степень

повышения давления в компрессоре π_k , температура газов свободной турбины T_5 , мощность компрессора N_k , мощность турбины N_T , расход воздуха G_B , отношения частоты вращения ротора низкого давления к частоте вращения ротора высокого давления N_1/N_2 , которые характеризуют дефект «Обрыв лопатки турбины».

Кроме того, разработанная методика предполагает превентивное определение дефектов опор по отклонению параметров: частота вращения ротора низкого давления N_1 , частота вращения ротора высокого давления N_2 , степень повышения давления в компрессоре π_k , температура газов свободной турбины T_5 , мощность компрессора N_k , мощность турбины N_T , расход масла G_M , температура масла T_M .

По результатам расчета отклонений выявляется наличие тренда в каждом характерном комплексе параметров.

Модуль «Экспертная система» обеспечивает анализ отклонений комплексов параметров. В результате работы узла формируется перечень параметров, имеющих отклонения, превышающие заданные, в эксплуатационных документах. После формирования перечня отклонений параметров происходит сравнение перечня с базой данных дефектов изделий. В базе данных каждому дефекту соответствует комплекс характерных отклонений термогазодинамических параметров (характерный комплекс). При совпадении характерного комплекса и отклонений параметров узел «Экспертная система» формирует предупреждение о возможном наличии дефекта в соответствующем узле.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной статье представлены результаты разработки методики оценки состояния ГТД и ГТУ на их основе. Рассмотрены основные этапы их диагностирования, а также функциональная модель автоматизированной системы диагностики. Разработанная методика дополняет существующие сегодня методики диагностики и позволяет расширить возможности по определению дефектов в узлах ГТД и ГТУ на их основе. Для верификации разработанной методики создана программа DIAGNOST-TREND.

Дальнейшие исследования предполагается продолжить в направлении апробации разработанной методики на эксплуатационных параметрах ГТУ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Автоматизация** процесса испытания авиационных ГТД на базе SCADA-системы LabView / И. А. Кривошеев [и др.] // Вестник УГАТУ. 2009. Т. 13, № 2 (35). С. 61–69. [I. A. Krivosheev, et al., "Automation of the testing process of aviation gas turbine engines based on the LabVIEW SCADA system", (in Russian), in *Vestnik UGATU*, vol. 13, no. 2 (35), pp. 61-69, 2009.]
2. **Кривошеев И. А., Суханов А. В.** Разработка комплексной автоматизированной системы диагностики ГТД на базе SCADA-технологий и имитационного моделирования // Вестник УГАТУ. 2014. Т. 18, № 2 (63). С. 134–141. [I. A. Krivosheev, A. V. Sukhanov, "Development of a comprehensive automated system for the diagnosis of gas turbine engines based on SCADA technologies and simulation modeling", (in Russian), in *Vestnik UGATU*, vol. 18, no. 2 (63), pp. 134-141, 2014.]
3. **Ахмед Х. С. А.** Контроль технического состояния авиационного газотурбинного двигателя в эксплуатации: дис. ... канд. техн. наук: 05.07.05. Казань, 2021. 221 с. [H. S. A. Ahmed, *Control of the technical condition of an aviation gas turbine engine in operation: Cand. Diss. Abstr.*, (in Russian). Kazan, 2021.]
4. **Григорьев В. А., Гишваров А. С.** Испытания авиационных двигателей. М.: Машиностроение, 2009. 504 с. [V. A. Grigoriev, A. S. Gishvarov, *Tests of aircraft engines*, (in Russian). Moscow: Mashinostroenie, 2009.]
5. **Ахмедзянов А. М., Дубравский Н. Г., Тунаков А. П.** Диагностика состояния ВРД по термогазодинамическим параметрам. М.: Машиностроение, 1983. 206 с. [A. M. Akhmedzyanov, N. G. Dubravskiy, A. P. Tunakov, *Diagnostics of the VRD by thermogasodynamic parameters*, (in Russian). Moscow: Mashinostroenie, 1983.]

ОБ АВТОРАХ

СУХАНОВ Андрей Владимирович, ассист. каф. АД. Дипл. магистра техники и технологии (УГАТУ, 2011). Готовит дис. о разработке методики параметрической диагностики и оценке состояния газотурбинных энергетических установок с использованием SCADA-технологий и имитационного моделирования.

АХМЕДЗЯНОВ Дмитрий Альбертович, проф. каф. авиац. двигателей, декан ФАДЭТ. Дипл. инж. по авиац. двигателям и энерг. установкам (УГАТУ, 1997). Д-р техн. наук по тепл., электроракет. двигателям и энергоустановкам ЛА (УГАТУ, 2007). Иссл. в обл. раб. процессов в авиационных ГТД, автоматизации испытаний.

METADATA

Title: Parametric diagnostics and assessment of the state of gas turbine power plants using SCADA-technologies and imitation modelling.

Authors: A. V. Sukhanov¹, D. A. Akhmedzyanov²

Affiliation: Ufa State Aviation Technical University (UGATU), Russia.

Email: ¹andrew.sukhanov@mail.ru, ²ada@ugatu.ac.ru

Language: Russian.

Source: Vestnik UGATU (scientific journal of Ufa State Aviation Technical University), vol. 25, no. 4 (94), pp. 83-90, 2021. ISSN 2225-2789 (Online), ISSN 1992-6502 (Print).

Abstract: The creation of a method for monitoring the state of operation of gas turbine engines (GTE) and gas turbine units (GTU) based on them, as well as a method for automating the process of testing and debugging products to improve the efficiency of parametric diagnostics of industrial gas turbine units based on aviation GTE based on the development of automated system of diagnostics and test control. The results of the operation of industrial gas turbines are generalized and the patterns and relationships of failures with operating modes and defects are revealed.

Key words: aircraft engines; parametric diagnostics; automation of tests; SCADA system, digital twin.

About authors:

SUKHANOV, Andrey Vladimirovich, Assist. Dept. of Aircraft engines. Master's degree in aircraft engines design (USATU, 2011).

AKHMEDZYANOV, Dmitriy Albertovich, Prof., Dept. of Air-craft Engines, Energy and Transportation Engineering. Dipl. engineer in aircraft engines design (USATU, 1997). Dr. of Tech. Sci. (USATU, 2007).