

УДК 621.4.001.4

ВЫЯВЛЕНИЕ ДЕФЕКТОВ В УЗЛАХ ГАЗОТУРБИНЫХ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВОК С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ SCADA-ТЕХНОЛОГИЙ И ИМИТАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

А. В. СУХАНОВ¹, Д.А. АХМЕДЗЯНОВ²

¹andrew.sukhanov@mail.ru, ²akhmedzyanov@yandex.ru

ФГБОУ ВО «Уфимский университет науки и технологий» (УУНИТ)

Поступила в редакцию 10.01.2023

Аннотация. Рассмотрена классификация дефектов, возникающих в узлах газотурбинных двигателей (ГТД) и газотурбинных установок (ГТУ) на их основе. Рассмотрен способ выявления дефектов, основанный на применении комплексного подхода к параметрической диагностике с применением имитационных математических моделей и SCADA-системы. Выполнена оценка влияния времени развития дефекта на степень достоверности результата диагностирования, и предложены способы повышения степени достоверности.

Ключевые слова: авиационные двигатели; параметрическая диагностика; автоматизация испытаний; SCADA-система; дефекты ГТУ.

ВВЕДЕНИЕ

Во время эксплуатации, а также при испытаниях газотурбинных двигателей и энергетических установок неизбежно возникают физические изменения, связанные с процессом работы. Помимо допустимых изменений, находящихся в поле допуска, как правило, возникают и такие, которые превышают значения, регламентируемые нормативными документами на изделие (дефекты). К данному виду относятся физические изменения, такие как повреждения поверхности, забоины, риски, коррозия, загрязнение, наплавление, изменение зазоров, износ деталей, прогар и коробление лопаток в горячей части, трещины в дисках и лопатках и многие другие дефекты, влияние которых на работу современного ГТД в высшей мере велико. Многие из вышеперечисленных дефектов могут привести к необратимым последствиям как для детали или узла ГТД, так и для двигателя или даже летательного аппарата в целом.

Безопасность эксплуатации изделия во многом зависит от своевременности обнаружения дефекта, определения его влияния на работоспособность детали или узла, своевременного устранения дефекта, либо отстранения изделия от эксплуатации. В свою очередь, принятие решения о выводе из эксплуатации либо устранении дефекта и продолжении работы возможно при наличии достоверной информации о возникновении того или иного дефекта. Наибольшую пользу такая информация может принести на ранних стадиях развития дефекта, когда он только начинает развиваться и еще не в полной мере влияет на работу узла и его параметры.

Однако, анализируя не тренд каждого из параметров в отдельности, а совокупность изменений характерных комплексов параметров, в ряде случаев можно определить некоторую закономерность отклонений параметров в зависимости от проявляемого дефекта [3].

Особенно актуальной задача выявления дефектов является при разработке методов и средств для обеспечения развития цифровизации в рамках приоритетных задач, поставленных на государственном уровне. Одной из таких концепций, получившей развитие в последние 3–4 года, является концепция «цифрового двойника» изделия.

На текущий момент рассматривается создание цифровых двойников на различных стадиях жизненного цикла изделия. Итогом предлагаемой концепции является создание цифрового двойника, описывающего изделие на всех этапах жизненного цикла (рисунок 1). Дальнейшее развитие данной концепции может пойти по различным трекам. Наиболее вероятным представляется развитие с разработкой алгоритмов искусственного интеллекта, основанных на оценке большого количества экспериментальных и эксплуатационных данных.



Рис. 1. Концепция цифрового двойника на различных стадиях жизненного цикла изделия

Наиболее вероятным представляется развитие с разработкой алгоритмов искусственного интеллекта, основанных на оценке большого количества экспериментальных и эксплуатационных данных. Развитие в этом ключе позволит при использовании современных достижений в области автоматизированной компьютерной обработки больших объемов данных (Big Data) перейти к эксплуатации изделий не только по техническому состоянию, но и к эксплуатации с отложенными отказами, так как позволит производить диагностику изделий и оценку состояния узлов за приемлемое время и с обеспечением требуемого качества и обеспечения безопасности.

КЛАССИФИКАЦИЯ ДЕФЕКТОВ ДЕТАЛЕЙ АВИАЦИОННОЙ ТЕХНИКИ

Возникновение большинства дефектов возможно в нескольких случаях:

- повреждение в результате попадания постороннего предмета на вход в двигатель. Возможны как риски, задиры, загибы кромок и поверхностей рабочих лопаток, так и их обрыв.
- повышенная температура в узлах двигателя: камере сгорания, турбине, сопле. В результате воздействия высоких температур могут образоваться трещины и прогары.
- превышение критической частоты вращения роторов двигателя.
- износ в процессе эксплуатации, связанный с естественной выработкой ресурса.
- загрязнение тракта двигателя в процессе эксплуатации.
- некачественное изготовление (брак) деталей и сборочных единиц ГТД.

В целом дефекты деталей авиационной техники можно разделить на следующие группы:

1) по общетехническим признакам:

- по возможности выявления: явные и скрытые;
- по влиянию на безопасность применения и надежность: критические, значительные и малозначительные;

- по возможности устранения: устранимые и неустраняемые;

- по скорости развития: прогнозируемые, постепенные и внезапные;

2) по причинам возникновения:

- по причинам, заложенным на этапах жизненного цикла: конструкционные, производственные, ремонтные, эксплуатационные, транспортирования и хранения;

- естественного изменения технического состояния;

- воздействия средств поражения;

3) по размерам и степени распространения:

- субмикроскопические;

- микроскопические;

- макроскопические;

- местные;

- ограниченно распространенные;

- распределенные;

Необходимо отметить, что местные, ограниченно распространенные и распределенные дефекты относятся к объему или поверхности.

4) по видам внешнего воздействия:

- коррозионный;

- усталостный;

- теплового воздействия;

- изнашивания при трении;

- старения;

- воздействия статических и ударных нагрузок;

- воздействия световых и проникающих излучений;

- биоповреждений;

- насыщения другим веществом;

- воздействия электрического тока;

- отложений и загрязнений.

Внешнее воздействие изнашивания при трении разделяется на следующие виды износа:

- механический износ: абразивный, усталостный, при фреттинге, при заедании;

- коррозионно-механический износ: эрозионный, окислительный, фреттинг-коррозия;

- износ при действии электрического тока (электроэрозионный).

Также абразивный износ можно разделить на:

- абразив на поверхности детали;

- гидроабразивный износ;

- газоабразивный износ.

Эрозионный износ, относящийся к виду коррозионно-механического износа, разделяется на газоэрозионный и гидроэрозионный (кавитационный).

Сводная информация о классификации дефектов представлена на рисунке 2. Важной особенностью данной классификации является факт принадлежности характеристики абсолютно любого дефекта ко всем главным классификационным группам, а также наличия признаков в большинстве случаев и нескольких подгрупп.

Кроме того, к примеру, выделение группы классификации дефектов по размеру и степени распространения по поверхности и объему детали позволяет наиболее рационально определять необходимые средства неразрушающего контроля, в том числе с учетом классификации дефектов по видам внешнего воздействия.

Классификация дефектов по причинам возникновения обеспечивает более точное определение первопричины дефекта и проводить необходимые мероприятия по их предупреждению.

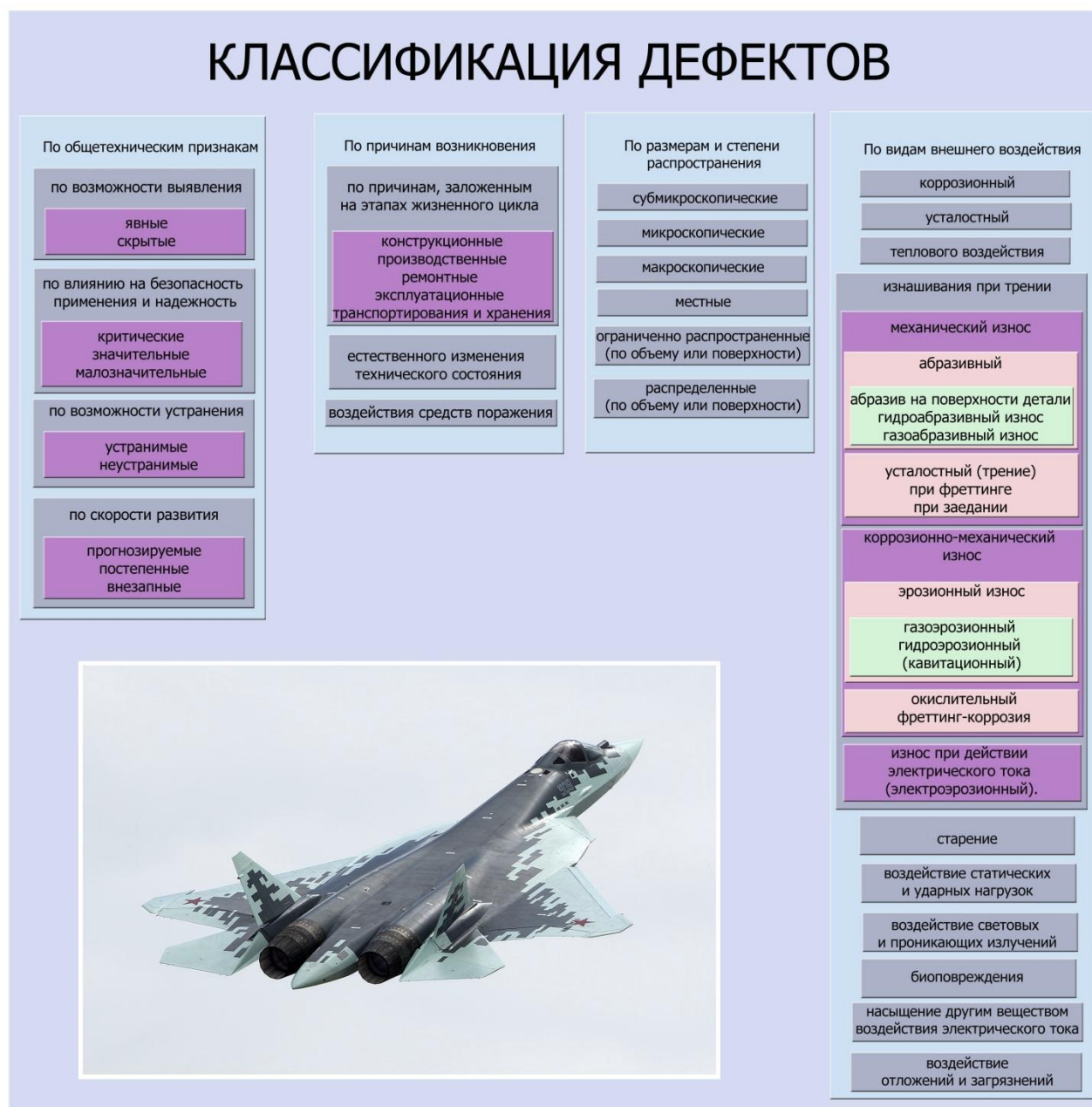


Рис. 2. Общая классификация дефектов

Особенное место при разработке методов диагностики состояния авиационных ГТД и ГТУ на их основе занимает область оценки степени опасности и динамики развития дефектов. Именно с целью оценки возможности негативного развития быстропротекающих процессов в первую очередь и создаются системы контроля и диагностики состояния.

Постепенные дефекты (падение давления масла в системе, появление стружки в масле, обледенение, масляное голодание опор) вызывают аварийное состояние двигателя за время, не превышающее времени полета (для ГТД), либо служат предупредительным сигналом персоналу для оценки состояния и принятия необходимых решений (для ГТУ). Классификация дефектов по причинам возникновения обеспечивает более точное определение первопричины дефекта и позволяет проводить необходимые мероприятия по их предупреждению.

Прогнозируемые дефекты являются медленно развивающимися и их развитие за время полета (для ГТД) или работы на режиме (для ГТУ) исключено или контролируется.

Внезапные дефекты наиболее опасны. Данный тип дефектов развивается крайне быстро и, как правило, приводит к наиболее негативным и непредсказуемым последствиям, существенно увеличивая материальные и временные затраты на устранение неисправности либо отказа, вызванного данным дефектом. В настоящее время во избежание данного типа дефектов применяются различные аварийные сигнализаторы и защитные устройства, реагирующие на приближение критического состояния изделия (отсечные топливные клапаны, сигнализаторы помпажа и др.). Данные устройства предназначены для аварийного прекращения работы во избежание выхода изделия из строя в результате аварии. По мере накопления статистической информации и обеспечения диагностического решения конкретной чрезвычайной (аварийной) ситуации возможен переход дефекта из разряда внезапных в разряд прогнозируемых дефектов. Однако такой подход достаточно затратен как в финансовом, так и в трудовом смысле затрат, так как требует увеличения объема препарирования, вывода из эксплуатации оборудования на доработку и проведения значительного объема экспериментальных работ.

Рассматривая методы неразрушающего контроля дефектов деталей, следует отметить аналогичные проблемы, связанные с необходимостью плановых остановов изделия для разборки, осмотра, восстановительного ремонта после разборки узлов с посадками, что также значительно увеличивает трудозатраты и финансовые потери от простоя изделия.

На рисунке 3 представлена общая классификация известных методов контроля и диагностики. По мнению авторов, наибольший положительный эффект в оценке технического состояния следует ожидать от такого метода диагностирования дефектов, который при наименьшем вмешательстве в штатную схему препарирования изделия позволит наиболее полно оценить вероятность возникновения того или иного дефекта. Данной цели возможно достичь при объединении методов параметрической диагностики и поэлементных имитационных моделей, описывающих объект как многосвязный с учетом изменения связей и характеристик.



Рис. 3. Общая классификация методов контроля и диагностики

МЕТОДИКА ПАРАМЕТРИЧЕСКОЙ ДИАГНОСТИКИ И ОЦЕНКИ СОСТОЯНИЯ

Вариантом решения обозначенных выше задач, связанных с прогнозированием дефектов и оценки состояния изделия при возникновении внезапных дефектов и быстропротекающих процессов (резкое изменение отношения частот вращения роторов высокого и низкого давлен

ия, заброс температуры, возрастание виброскорости и виброускорения и т.п.), является метод, основанный на оценке комплексов термогазодинамических параметров, характеризующих конкретный дефект изделия.

Основой методики является реализация предлагаемой системы диагностики на базе симбиоза поэлементной динамической имитационной модели ГТУ, системы сбора и обработки информации (автоматизированной информационно-измерительной системы) и экспертной системы, представляющей совокупность массивов статистической информации о работе штатно препарированного изделия.

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* [6].

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 рассматриваются 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 быстропротекающих процессов предлагается комбинировать существующий в отрасли подход с оценкой возможности отклика системы на изменение параметров быстропрот

екающего процесса. При использовании системы реального времени и реализации поэлементной динамической модели с возможностью работы с операционной системой реального времени (ОСРВ) возможно использование аварийных элементов управления (отсечные топливные клапаны, сигнализаторы помпажа и т.п.) как резервных, так как отклик (джиттер) ОСРВ на сигнал лежит в наносекундном диапазоне, а надежность работы системы обеспечивается за счет алгоритмов и программного обеспечения самой имитационной модели, реализованной на базе системы реального времени. При реализации предлагаемой системы диагностики на базе различных операционных систем, не обеспечивающих работу всех компонентов системы в режиме реального времени, предлагается рассматривать аварийные элементы контроля и управления как основные источники данных о состоянии изделия для обеспечения безаварийности работы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кривошеев И.А., Ахмедзянов Д.А., Кишалов А.Е., Суханов А.В., Ямалиев Р.Р. Автоматизация процесса испытания авиационных ГТД на базе SCADA-системы LabView // Вестник УГАТУ. 2009. Т. 13, № 2 (35). С. 61–69. [I. A. Krivosheev, D. A. Akhmedzyanov, A. E. Kishalov, A. V. Sukhanov, R. R. Yamaliev, "Automation of the testing process of aviation gas turbine engines based on the LabVIEW SCADA system", (in Russian), 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), Vestnik UGATU, vol. 18, no. 2 (63), pp. 134–141, 2014.]
3. Акимов В.М. Основы надежности газотурбинных двигателей. М.: Машиностроение, 2009. 207 с. [V.M. Akimov. "Fundamentals of reliability of gas turbine engines". (in Russian), Moscow: Mashinostroenie, 2009.]
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 thermogasdynamical parameters", (in Russian), Moscow: Mashinostroenie, 1983.]
6. Суханов А.В., Ахмедзянов Д.А. Параметрическая диагностика и оценка состояния газотурбинных энергетических установок с использованием SCADA-технологий и имитационного моделирования // Вестник Уфимского государственного авиационного технического университета. 2021. Т. 25. № 4 (94). С. 83-90. [A. V. Sukhanov, D.A. Akhmedzyanov, "Parametric diagnostics and assessment of the state of gas turbine power plants using SCADA technologies and simulation modeling", (in Russian). Vestnik UGATU, vol. 25, no. 4 (94), pp. 83-90, 2021.]

ОБ АВТОРАХ

СУХАНОВ Андрей Владимирович, ассистент 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., электроракетн. 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 University of Science and Technology (UUST), Russia.

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

Language: Russian.

Source: Vestnik UGATU (scientific journal of Ufa University of Science and Technology), vol. 27, no. 1 (99), pp. 98-105, 2023. ISSN 2225-2789 (Online), ISSN 1992-6502 (Print).

Abstract: The classification of defects arising in the units of gas turbine engines (GTE) and gas turbine units (GTU) based on them is considered. A method for detecting defects based on the application of an integrated approach to parametric diagnostics using simulation mathematical models and a SCADA system is considered. The influence of the defect development time on the degree of reliability of the diagnostic result was assessed, and ways to increase the degree of reliability were proposed.

Key words: aircraft engines; parametric diagnostics; test automation; SCADA system, gas turbine defects.

About authors:

SUKHANOV, Andrey Vladimirovich, assist. of the Dept. of Aircraft Engines. Master's degree in engineering and technology (USATU, 2011). Prepares a thesis on the development of a procedure for the parametric diagnostics and evaluation of the state of gas-turbine power plants using SCADA technologies and simulation modeling.

AKHMEDZYANOV, Dmitriy Albertovich, Prof., Dean of the Faculty of Aircraft Engines, Energy and Transportation Engineering. Dipl. engineer in aircraft engines and power plants (USATU, 1997). Cand. Tech. Sci. (USATU, 2000), Dr. Tech. Sci. (USATU, 2007). Studies in the area of working processes in aircraft gas-turbine engines, testing automation.