

УДК 621.452.3:621.311.001.57:629.4.051.2

**Н.Д. БАГАУТДИНОВ¹, Д.И. ВОЛКОВ², С.В. ЕПИФАНОВ³, В.А. КАЧУРА⁴,
В.Ф. МИРГОРОД², Г.С. РАНЧЕНКО²**

¹ ГП «Ивченко-Прогресс», Запорожье, Украина

² ОАО «Элемент», Одесса, Украина

³ Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Украина

⁴ ОАО «Мотор Сич», Запорожье, Украина

РЕАЛИЗАЦИЯ И ВНЕДРЕНИЕ МЕТОДОВ И АППАРАТНО-ПРОГРАММНЫХ СРЕДСТВ КОМПЛЕКСНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ, УПРАВЛЕНИЯ И ДИАГНОСТИРОВАНИЯ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ СИЛОВЫХ И ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВОК НА БАЗЕ ГАЗОТУРБИННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

Выполнен анализ существующих аппаратных и программных решений в области комплексного моделирования, управления и диагностирования технического состояния силовых и энергетических установок на базе газотурбинных двигателей. Рассмотрена концепция построения аппаратно-программного комплекса, а также его внедрение в процесс испытаний и эксплуатации газотурбинных двигателей. Показана актуальность разработки методических указаний по использованию комплекса и результатов его работы при производстве и эксплуатации по техническому состоянию двигателей, а также при настройке электронных систем управления и диагностирования технического состояния.

управление, диагностирование, испытания, эксплуатация по техническому состоянию, газотурбинный двигатель, индивидуальная математическая модель

Введение

Одним из основных направлений усовершенствования процессов испытаний, управления и диагностирования технического состояния двигателей является использование математических моделей и современных информационных технологий [1].

Повышение качества управления рабочим процессом ГТД обеспечивает расширение предельных режимов работы, то есть ограничений по предельным температурам, частотам вращения и нагрузкам, снижает удельный расход топлива, продлевает ресурс двигателя, а также улучшает его динамические характеристики. Кроме того, расширение информационных возможностей систем управления и мониторинга обеспечивает значительное снижение затрат на стендовые и лётные испытания при доводке проектируемых двигателей, что особенно актуально в условиях жёсткой экономии финансовых ресурсов.

Значительный вклад в формирование и усовершенствование систем управления и мониторинга

ГТД сделали В.И. Васильев, О.С. Гуревич, В.Т. Дедеш, Г.В. Добрянский, Б.Г. Ильясов, Г.Г. Куликов, Т.С. Мартынова, Б.Н. Петров, В.Ю. Рутковский, Д.Ф. Симбирский, А.П. Тунаков, А.И. Фрид, Ф.А. Шаймарданов, А.А. Шевяков и др. Ими разработаны методические подходы к математическому моделированию двигателей, идентификации моделей по экспериментальным данным, анализу и синтезу их САУ, методы и алгоритмы мониторинга состояния. Показано, что необходимым условием реализации обозначенного направления является использование математических моделей ГТД.

1. Формулирование проблемы

Существующие программно-технические комплексы для испытаний газотурбинных двигателей (ГТД), в частности производства ОАО «Элемент» (АХША.442293.000 ТУ [2]), обеспечивают [3]:

– измерение, математическую обработку, отображение и регистрацию параметров работы двигателей в процессе стендовых испытаний;

– определение метрологических характеристик измерительных и вычислительных каналов при их аттестации, калибровке и поверке [4];

– определение периодов осреднения основных термогазодинамических параметров двигателей на основе корреляционного анализа [5];

– управление режимами работы двигателя в соответствии с технологическим процессом испытаний;

– аварийную защиту двигателя и систем;

– ведение архивов трендов, аварий и событий.

Однако современные требования к процессу испытаний двигателей, автоматического управления и диагностирования ГТД требуют использования математических моделей [6] и информационных технологий, что подтверждается специалистами ведущих украинских (НАУ «ХАИ», НАУ, ГП «Ивченко-Прогресс», ОАО «Мотор Сич», ГП «Зоря-Машпроект») и российских (ЦИАМ, НПО «Салют», НПО «Сатурн», МАИ) двигателестроительных и научных организаций.

Так, например, в России в течение 2002 – 2006 годов в рамках Федеральной целевой программы «Национальная технологическая база», утверждённой постановлением Правительства Российской Федерации от 8 ноября 2001 г. № 779 было предусмотрено финансирование в размере 130 млн. руб. разработки базовых технологий имитационного моделирования сложных социально-технических систем – комплексных программных средств для использования в системах управления, моделирования, экспериментальной обработки и испытаний, обеспечивающих сокращение или исключение необходимости в дорогих и небезопасных натуральных испытаний.

Итак, можно выделить три основных направления использования математических моделей и информационных технологий:

– программно-технические комплексы (АСУ ТП) испытаний газотурбинных двигателей;

– электронные системы автоматического управления газотурбинных двигателей;

– электронные системы диагностирования технического состояния газотурбинных двигателей.

2. Решение проблемы

Внедрение математических моделей и информационных технологий в программно-технических комплексах обеспечивает автоматизацию:

– приведения экспериментальных данных к стандартным атмосферным условиям, в частности при невыполнении условий подобия [6, 7];

– продления экспериментально полученных характеристик по высотно-скоростным условиям и режимам работы двигателя [7];

– диагностирования технического состояния двигателя и определение соответствия характеристик испытываемого двигателя требованиям ТУ;

– диагностирования исправности измерительных каналов за счёт аналитической избыточности;

– косвенных измерений параметров работы ГТД.

Современные методы доводки двигателей и их узлов нереализуемы без интеграции с математическими моделями ГТД. Автоматизация идентификации уточнённой индивидуальной модели двигателя позволяет обеспечить автоматизацию наладки ГТД на этапе стендовых испытаний после его изготовления и проведения регламентных работ, в частности ремонта, в эксплуатации. Сопровождение ГТД в эксплуатации требует использования его диагностических математических моделей [8].

Внедрение математических моделей и информационных технологий в системах автоматического управления ГТД с полной ответственностью (FADEC) обеспечивает:

– наладку алгоритмов управления;

– выявление отказов измерительных каналов, выбор исправного канала при его дублировании или подмену параметров, рассчитанных с помощью математических моделей;

– определение неизмеряемых или измеряемых с недостаточной точностью параметров (тяги, мощности, удельного расхода топлива) по измеряемым термогазодинамическим параметрам [1].

В системах диагностирования технического состояния ГТД используется его индивидуальная математическая модель, которая служит эталоном для сравнения с ней текущих параметров двигателей. В частности за счёт использования базовой модели возможен контроль соответствия выходных параметров математической модели и вектора измерения.

Достоверность контроля определяется точностью идентификации индивидуальных моделей нормального состояния.

Поэтому в настоящее время в рамках государственной программы Развития авиационной промышленности Украины до 2010 года ОАО «Элемент» в тесной кооперации с ОАО «Мотор Сич», ГП «Ивченко-Прогресс» и НАУ им. Н.Е. Жуковского «ХАИ» выполняет проект реализация и внедрение аппаратно-программного комплекса (АПК) «Энергия-XXI» для комплексного моделирования, управления и диагностирования технического состояния силовых и энергетических установок на базе ГТД (рис. 1).

АПК «Энергия-XXI» выполняет сбор и регистрацию данных во время работы газотурбинных двигателей в реальном времени. Регистрация выполняется во время стендовых испытаний или эксплуатации на борту летательного аппарата, установки для перекачивания газа и других объектах.

На основе собранных данных выполняется:

- диагностирование технического состояния двигателя, локализация отказов и выдача рекомендаций по их устранению;
- диагностирование измерительных каналов;
- идентификация индивидуальной математической модели и контроль её соответствия требованиям технических условий на двигатель;

– формирование моделей в формате, который используется в программно-технических комплексах, системах управления и диагностики;

– формирование законов управления и инженерного контроля технического состояния ГТД;

– расчет и экстраполяция технических характеристик ГТД во всём диапазоне режимов работы, высотно-скоростных и климатических условий эксплуатации;

– определение параметров работы ГТД по его модели;

– приведение экспериментальных данных к стандартным атмосферным условиям.

В рамках проекта разрабатываются методические указания, определяющие использование АПК «Энергия» и результатов его работы в программно-технических комплексах испытаний авиационных двигателей испытаний, системах управления и диагностирования технического состояния ГТД.

В программно-технических комплексах согласно разрабатываемых методических указаний должны использоваться:

- нелинейная динамическая модель ГТД;
- алгоритмы контроля технического состояния ГТД в соответствии с ТУ на ГТД;
- наблюдатель состояния для косвенного измерения параметров работы ГТД;
- алгоритмы приведения параметров к стандартным атмосферным условиям;
- алгоритмы контроля исправности измерительных каналов.

В системах автоматического управления ГТД согласно разрабатываемых методических указаний должны использоваться:

- квазилинейная динамическая модель ГТД;
- законы управления работой ГТД;
- алгоритмы инженерного контроля технического состояния двигателей и измерительных каналов;
- алгоритмы мажорирования для определения отказа дублированных каналов;

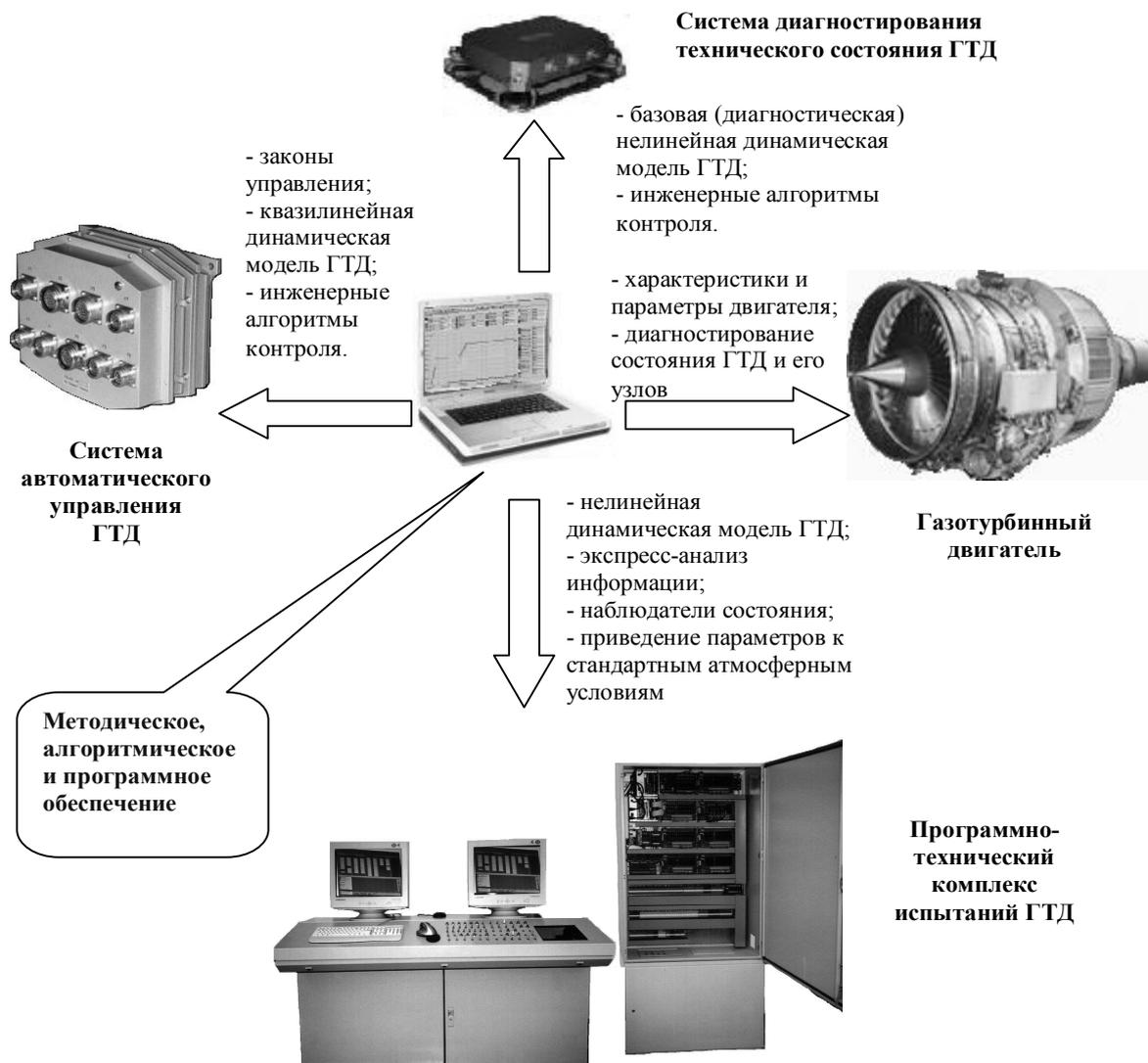


Рис. 1. Аппаратно-программный комплекс «Энергия-XXI» и взаимодействующие с ним системы

– наблюдатели состояния для косвенного изменения параметров работы двигателей.

В системах диагностирования согласно методическим указаниям должны использоваться

- диагностическая динамическая модель ГТД;
- алгоритмы контроля и диагностирования технического состояния двигателя;
- наблюдатели состояния для косвенного изменения параметров работы двигателей.

Полученные с помощью АПК «Энергия-XXI» результаты должны использоваться специалистами для наладки двигателей, для исследования режимов их работы при помощи комплексного моделирования, что позволяет значительно снизить затраты на доводку двигателей и исследования граничных ре-

жимов их работы.

В АПК «Энергия-XXI» поступает информация в режиме реального времени и апостериорная информация в виде баз данных трендов термогазодинамических параметров работы ГТД, зарегистрированных другими системами при стендовых испытаниях или при эксплуатации. Эта информация предварительно обрабатывается, в частности отбраковываются ошибочные данные [9], выполняется оптимальная фильтрация.

Предложенная схема позволяет также выполнять оптимальную наладку ГТД, обеспечивающую минимизацию функционала качества с учётом эксплуатационных ограничений. Эта оптимизация позволяет повысить суммарную тягу на 1,5...2,0 % без

повышения расхода топлива [10], то есть снизить удельный расход топлива на 1,5...2,0 %.

Заключение

В проекте в целом предлагаются новые качественные возможности при проведении стендовых испытаний ГТД.

Отличие проекта в том, что предлагается интегрированное в процесс испытаний решение задач:

- идентификации индивидуальных нелинейных поузловых и квазилинейных моделей;
- диагностирования технического состояния двигателей с использованием статистических методов, в частности трендового контроля;
- определения характеристик двигателя и их расширения (экстраполяции) по высотно-скоростным условиям и режимам работы двигателя;
- методической поддержки использования результатов при производстве и эксплуатации ГТД.

Внедрение АПК «Энергия-XXI» обеспечивает снижение затрат на:

- регулирование и ПСИ ГТД на 35...50 %;
- стендовые испытания ГТД на 20...25 %;
- лётные испытания ГТД на 15...20 %.

Литература

1. Синтез систем управления и диагностирования газотурбинных двигателей / С.В. Епифанов, Б.И. Кузнецов, И.Н. Богаенко, Г.Г. Грабовский. – К.: Техніка, 1998. – 312 с.
2. Программно-технический комплекс для испытания авиационных двигателей. Технические условия АХША.442293.000 ТУ.
3. Программно-технические комплексы для испытания ГТД: математическое, метрологическое и алгоритмическое обеспечение / А.Г. Буряченко, Д.И. Волков, С.Н. Долгий, В.В. Сироткин // Авиадвигатели XXI века: Материалы II Междунар. науч.-техн. конф. (6-9 декабря 2005 г.): Сб. тез. – М.: ЦИАМ, 2005. – Т. 3. – С. 235-237.
4. Ранченко Г.С., Буряченко А.Г., Волков Д.И. Оценка погрешностей косвенных измерений при испытаниях газотурбинных двигателей // Авиационно-космическая техника и технология. – 2003. – Вып. 41/6. – С. 160-163.
5. МУ 1.1.180-88. Метрологическое обеспечение испытаний ГТД. Методика определения корреляционных характеристик параметров ГТД на установившихся и неуставившихся режимах испытаний с применением информационно-измерительных систем.
6. Челомбитько А.В., Швец Л.И. Применение математического моделирования при обработке результатов стендовых испытаний авиационных ГТД // Авиадвигатели XXI века: Материалы II Междунар. науч.-техн. конф. (6-9 декабря 2005 г.): Сб. тез. – М.: ЦИАМ, 2005. – Т. 1. – С. 123-125.
7. Челомбитько А.В., Швец Л.И. Применение математического моделирования при испытаниях опытных авиационных ГТД на высотных стендах // ЦИАМ 2001-2005. Основные результаты научно-технической деятельности. / Под ред. В.А. Скибина, В.И. Солонина, М.Я. Иванова. В 2-х т., Т. 1. Разд. 1.1. – М.: ЦИАМ, 2005. – С. 53-57.
8. Цховребов М.М., Худяков Е.И. Математическое моделирование изменения параметров ТРДД в процессе эксплуатации // ЦИАМ 2001-2005. Основные результаты научно-технической деятельности / Под ред. В.А. Скибина, В.И. Солонина, М.Я. Иванова. В 2-х т., Т. 1. Разд. 1.1. – М.: ЦИАМ, 2005. – С. 61-64.
9. СТ СЭВ 545-77 Прикладная статистика. Правила оценки аномальности результатов наблюдений.
10. Параметрическое оценивание экспериментальных данных с применением ММ термодинамического расчёта ТРД / М.В. Егорцев, В.А. Рыбко, А.П. Царьков, Л.М. Чернышев // Авіаційно-космічна техніка і технологія: Зб. наук. пр. – 2001. – Вип. 26. Двигуни та енергоустановки. – С. 184-185.

Поступила в редакцию 1.06. 2007

Рецензент: д-р техн. наук, проф. В.А. Герлига, Одесский национальный политехнический университет, Одесса.