

УДК 681.518.5

В.М. Грудинкин¹, В.А. Качура²

¹ОАО «Элемент»,
²ОАО «Мотор Сич»

МЕТОДЫ И СРЕДСТВА МОДЕЛЬНОЙ ПОДДЕРЖКИ ПРОЦЕССОВ РАЗРАБОТКИ АСУ СТЕНДОВЫМИ ИСПЫТАНИЯМИ ГАЗОТУРБИННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

Отражены основные требования к АСУ технологическим процессом стендовых испытаний газотурбинных двигателей. Освещены проблемные вопросы, возникшие при информационном и математическом обеспечении процессов разработки и эксплуатации АСУ стендовыми испытаниями, и обоснованы пути их решения. Приведены предлагаемые решения по архитектуре и составу аппаратной и программной части средств модельной поддержки, предназначенных для обеспечения разработки указанных АСУ. Предложены варианты повышения адекватности математической модели и достижения соответствия конкретному экземпляру двигателя. Определены перспективы дальнейших исследований.

Стендовые испытания, автоматизированная система управления, модельная поддержка, индивидуальная динамическая математическая модель

Введение

Одним из наиболее важных этапов создания новых высокотехнологичных и ответственных объектов энергетики (ОЭ) является этап стендовых испытаний (СИ). От успешности проведения СИ, в первую очередь, зависят сроки освоения и качественный уровень создаваемых новых ОЭ.

Стендовые испытания в настоящее время рассматриваются как специфический и ответственный технологический процесс, который требует создания соответствующих автоматизированных систем управления (АСУ СИ). Создание таких АСУ, в наибольшей мере отвечающих сложности процессов в испытываемых энергетических объектах, является важной научно-технической проблемой для ряда отраслей, в частности, для отрасли газотурбостроения.

Обеспечение заданных технологических, ресурсных и экономических показателей вновь создаваемых силовых установок на базе газотурбинных двигателей (ГТД), их соответствие международно-признанным нормам достигается, в том числе, на основе совершенствования методов и средств автоматизации стендовых испытаний опытных и серийных двигателей с применением современных информационных технологий.

Применяемые АСУ СИ являются сложными информационно-измерительными и управляющими системами, обрабатывающими в реальном времени информацию по сотням измерительных каналов (ИК), контролирующими весь процесс СИ, управляя его протеканием по установлен-

ной программе и обеспечивая разработчиков объекта всей необходимой информацией как в интерактивном режиме, так и в виде соответствующей документации. Примером таких АСУ являются программно-технические комплексы (ПТК) для обеспечения СИ [1], разрабатываемые и поставляемые ОАО «Элемент» (г. Одесса) – головной организацией Минпромполитики Украины по научно-техническому направлению «Электронные системы измерения, контроля параметров и управления авиационными двигателями».

Проведение СИ является длительным процессом и требует существенных материальных затрат. Достигнутый высокий уровень понимания термогазодинамических процессов превращения энергии, протекающих в работающем ГТД, позволил в настоящее время предложить адекватные математические модели (ММ) ГТД, и на их основе определять характеристики объекта в широком диапазоне условий эксплуатации, замещающая трудоемкие этапы СИ компьютерным моделированием [2..4].

Однако такие средства математического моделирования не интегрированы непосредственно в АСУ СИ, применяемые ММ ГТД не охватывают модели процессов управления такими объектами, что ограничивает возможности применяемых АСУ.

Для дальнейшего совершенствования АСУ СИ необходимо создание соответствующих средств модельной поддержки (СМП) как процессом разработки АСУ, так и процессом непосредственно стендовых испытаний.

Целью настоящей работы является обоснование архитектуры и состава средств модельной поддержки АСУ стендовых испытаний ГТД, на основе понимания задач, стоящих перед разработчиками и испытателями.

1. Средства модельной поддержки в АСУ СИ

Под СМП понимается совокупность математических моделей процессов измерения, контроля и управления объектом стендовых испытаний, реализованных на базе программно-аппаратных средств АСУ СИ.

Целью создания СМП является повышение качественных и количественных показателей, характеризующих АСУ СИ, а именно:

- сокращение сроков разработки АСУ и проведения непосредственно СИ;
- повышение надежности технических решений при разработке АСУ путем их предварительной отработки с помощью ММ;
- улучшение метрологических характеристик ИК АСУ, достоверности и точности измеряемых параметров;
- повышение надежности контроля параметров объекта в процессе СИ путем сопоставления значений контролируемых параметров, наблюдаемых в процессе испытания, со значениями, определяемыми по ММ;
- усовершенствование алгоритмов управления объектом СИ путем их предварительной проверки на ММ процессов управления;
- обеспечение АСУ СИ информацией о косвенно-измеряемых и неизмеряемых параметрах объекта СИ (тяга, мощность и т.п.), получаемых по его ММ;
- получение «электронного паспорта» объекта СИ в виде его индивидуальной диагностической ММ, необходимой для решения задач оценки технического состояния в процессе последующей эксплуатации;
- обеспечение разработчиков объекта необходимой информацией об отклонениях параметров от проектных значений и причинах этих отклонений для внесения изменений в конструкцию;
- обеспечение разработчиков электронных систем управления (ЭСУ) необходимыми для проектирования данными в виде индивидуальной динамической ММ объекта управления во всем диапазоне рабочих режимов.

2. Задачи средств модельной поддержки

Применительно к специфике АСУ СИ, должна обеспечиваться модельная поддержка:

- процессов разработки новых перспективных АСУ с более высокими характеристиками и процессов модернизации и усовершенствования существующих АСУ путем расширения их функциональных возможностей;

- непосредственно процессов проведения стендовых испытаний новых объектов для повышения надежности и достоверности получаемых результатов, сокращения сроков СИ и расширения формата получаемых данных.

Решение первой задачи осуществляется на основе применения на всех этапах разработки АСУ эталонных ММ ИК и процессов управления для отработки проектных аппаратно-программных технических решений, их верификации и обеспечения приемо-сдаточных испытаний АСУ на стендах-имитаторах.

Решение второй задачи осуществляется путем реализации в составе АСУ программно-аппаратной подсистемы СМП, взаимодействующей с АСУ в процессе стендовых испытаний.

3. Требования к подсистеме СМП в составе АСУ СИ

Подсистема СМП в составе АСУ СИ должна обеспечивать автоматизацию выполнения следующих функций:

- формирование баз данных СИ, их статистическая обработка;
- оценка газодинамических (дрессельных) характеристик ГТД в процессе СИ и построение его индивидуальной статической ММ;
- обучение и параметризация индивидуальной динамической ММ процессов управления ГТД на режимах, ее эквивалентные преобразования к виду, необходимому разработчику ЭСУ;
- оценка статистических характеристик ИК АСУ, функций распределения ошибок, доверительных интервалов и надежности получаемых данных;
- оценка косвенно-измеряемых и неизмеряемых параметров ГТД, вычисляемых по ММ ИК и ММ процессов управления;
- построение диагностической ММ ГТД в виде его «электронного паспорта».

Подсистема СМП реализуется в виде SCADA-системы открытой архитектуры, допускающей подключение новых программно-аппаратных блоков для расширения ее функциональных возможностей. Предусматривается удаленный доступ к подсистеме СМП со стороны ее разработчика.

Программное обеспечение подсистемы СМП должно включать универсальные программные продукты для моделирования (MATLAB, LabVIEW).

4. Архитектура подсистемы СМП в составе АСУ СИ

Информационная система, в которую входит СМП, представляет собой территориально распределенный объект. Составными единицами системы являются:

- источники новых данных (ПТК на моторных стендах и другие информационные системы);
- рабочие места конструктора (РМК);
- сервер баз данных.

При необходимости сервер параллельно выполняет функции РМК. Структурная схема аппаратной части СМП приведена на рис. 1.

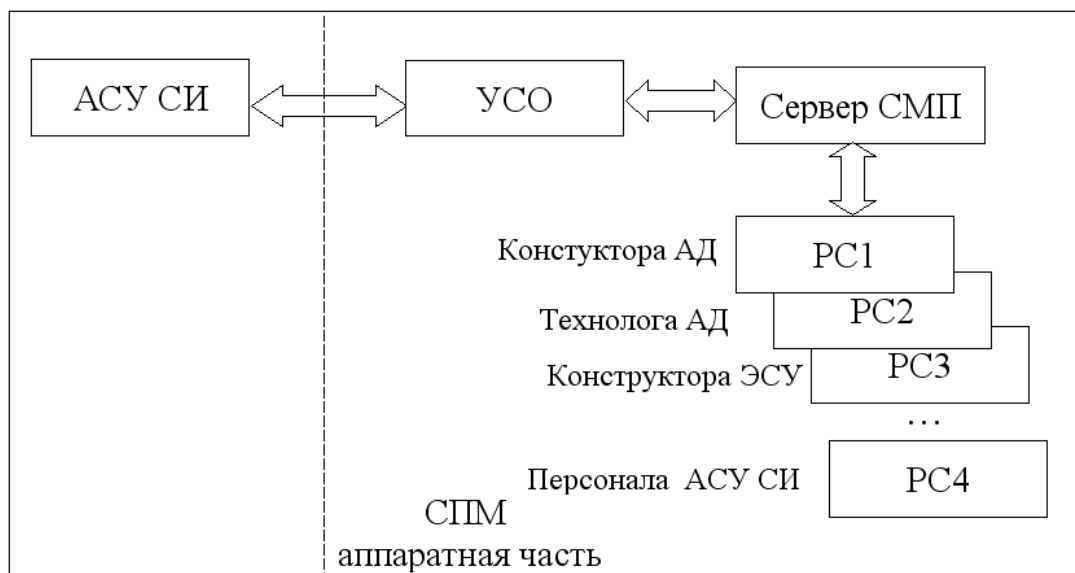


Рис. 1. Структурная схема аппаратной части СМП

На рис. 2 приведена структурная схема программной части СМП.

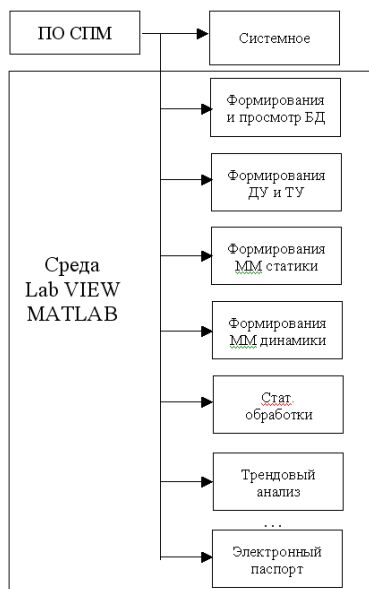


Рис. 2. Структурная схема программной части СМП

Сбор данных выполняется в автоматизированном режиме. Протокол взаимодействия одинаков для всех ПТК. Эта совместимость обеспечивается на стороне ПТК за счет использования специальных программ (агентов), выполняющих сбор и передачу архивов базы данных на сервер. В протоколе унифицирован состав сопутствующей архиву информации об испытании. Для исклю-

чения потери информации файлы базы данных архивируются в исходном формате. Реализована процедура периодического контроля целостности хранящихся на сервере архивов, для чего сохраняются HASH-функции каждого архива.

5. Модели процессов управления в подсистеме СМП

Наиболее важной составной частью СМП по их назначению являются математические модели, в частности, модели процессов управления объектом испытаний.

Модели ГТД, входящие в состав технических заданий на проектирование ЭСУ, являются кусочно-линейными динамическими моделями и содержат в своем составе статическую и динамическую модели.

Статическая модель задается в виде основных зависимостей, отражающих дроссельные характеристики двигателя.

Применяемые динамические модели ГТД являются кусочно-линейными дифференциальными моделями пространства состояний (КЛДМ).

Указанные ММ могут строиться либо на основе расчетных термогазодинамических характеристик объекта испытаний, заложенных при проектировании, либо на основе характеристик, полученных путем идентификации по базам данных стендовых испытаний ГТД. В первом случае мы получаем, как правило, модель, отражающую свойства некоторого типового двигателя – эталона, проектируемого при разработке, а во втором – есть возможность получить модель кон-

кретного экземпляра, нередко существенно отличающуюся от типовой.

Указанные КЛДМ успешно применяются в качестве средства модельной поддержки разработки ЭСУ и реализуются в стендах-имитаторах, однако, имеют ряд существенных недостатков, основными из которых являются следующие:

1) по своей организации такие ММ являются численным средством решения систем нелинейных дифференциальных уравнений и требуют значительных вычислительных ресурсов;

2) при достаточно высокой точности статической модели, уточняемой обычно на стендовых испытаниях, динамическая модель является плохо идентифицируемой;

3) имеют место разрывы в точках сопряжения диапазонов аппроксимации, а так как координаты состояния являются оборотами турбин, то наблюдается разрывность ускорений, что недопустимо, в частности, при моделировании турбовальных ГТД.

Поэтому КЛДМ нуждаются в усовершенствовании для решения традиционных задач и существенной доработке для получения оценок параметров в ЭСУ.

Необходимо также определить способы обучения КЛДМ непосредственно по базам данных испытаний и эксплуатации. КЛДМ по своей структурной организации представляет собой следящую систему, что автоматически обеспечивает совпадение установившихся значений с их статическими, заданными известными характеристиками ГТД. Так как эти характеристики заданы таблично, то, следуя ТЗ на ЭСУ, промежуточные точки получают путем линейной интерполяции.

Соответственно, в переходных режимах имеет место дополнительная динамическая скоростная ошибка воспроизводства параметров двигателя на его ММ, искажающая динамические характеристики объекта, что необходимо учитывать при настройке алгоритмов управления ЭСУ.

В работе предложено выполнить компенсацию такой скоростной ошибки методом динамической коррекции по входному сигналу, повысить на этой основе динамическую точность модели. Выполненная компьютерная реализация усовершенствованной КЛДМ двигателя Д-436 в режимах приемистость – встречная приемистость в сопоставлении с реальными базами данных испытаний подтвердила возможность уменьшения указанной ошибки в 1,5 – 2 раза.

Установлен факт избыточности применяемых КЛДМ ГТД, позволяющих воспроизвести все термогазодинамические параметры при заданных управляющих и возмущающих воздействиях, во время как часть таких параметров являются

непосредственно измеряемыми (обороты турбин) с высокой точностью (0,1 %). Впервые предложено использовать такие параметры в качестве входных в ММ, что существенно упрощает ее структуру и обеспечивает безитерационное получение косвенно-измеряемых термогазодинамических параметров ГТД в процессе их стендовых испытаний.

Для повышения адекватности ММ и достижения соответствия особенностям конкретного экземпляра двигателя предлагаются два подхода: на основе статистического анализа БД испытаний и путем реализации алгоритмов адаптации.

Заключение

Необходимость измерения, контроля и управления параметрами двигателей при их испытаниях определило необходимость создания автоматизированных систем управления стендовых испытаний, позволяющих интегрировано решать задачи измерения, контроля параметров, управления и диагностики. Современные АСУ СИ содержат совокупность взаимосвязанных средств технологического, информационного, математического и программного обеспечения, которые позволяют обеспечить высокие качественные и количественные показатели процессов в комплексах стендовых испытаний.

Целью создания перспективных систем является не только обеспечение в полном объеме, с высокой достоверностью программы испытаний, реализуемой в стендовых условиях, но и создание условий для оценки соответствия достигнутых высотно-климатических характеристик двигателя проектным характеристикам, а также обеспечение необходимыми исходными данными разработчиков бортовых систем измерения параметров, контроля и управления ГТД.

Реализация указанной целевой установки может быть достигнута путем создания и усовершенствования средств модельной поддержки при разработке современных автоматизированных систем управления стендовыми испытаниями на основе широкого применения математических моделей как двигателя и силовой установки в целом, так и математических моделей измерительных каналов и процессов управления.

Применение математических моделей процессов контроля параметров и управления объектом испытаний требует обоснования единых требований к средствам математического описания моделируемых процессов и их программной реализации, что и определяет перспективы дальнейших исследований.

Перечень ссылок

1. «ОАО «ЭЛЕМЕНТ» 2001-2007 Основные результаты научно-технической деятельности»

Сборник научных трудов / Под общей редакцией Ранченко Г.С., Миргорода В.Ф. – 2008 – 333с.

2. Миргород В.Ф. Обучение имитационных дифференциальных и интегральных моделей авиационных двигателей / Миргород В.Ф., Грудинкин В.М. // «Искусственный интеллект». - №4. – 2006. – С.329-334.

3. Епифанов С.В. Синтез систем управления и диагностирования газотурбинных двигателей / Епифанов С.В., Кузнецов В.И., Богаенко И.И. и др. // - К.: Техника, 1998. - 312 с.

4. Гольберг Ф.Д. Применение в САУ поузловой математической модели двигателя для парирования отказов датчиков / Гольберг Ф.Д., Гу-

рвич О.С., Чернышов В.И. // ЦИАМ 2001 - 2005. Основные результаты научно-технической деятельности. - М.: ЦИАМ, 2005. - С.337 - 342.

5. Разработка мобильного аппаратно-программного комплекса для проведения испытаний, комплексного моделирования и диагностирования технического состояния силовых установок на базе газотурбинных двигателей / Ранченко Г.С., Миргород В.Ф., Волков Д.И., Грудинкин В.М. и др. // Отчет по НИОКР. – № 0107U010220 – 2008. –75 с.

Поступила в редакцию 01.06.2010 г.

V.M. Grudinkin, V.A. Kachura

METHODS AND FACILITIES OF MODEL SUPPORT OF ACS DEVELOPMENT PROCESSES FOR THE STAND TESTS OF GAS TURBINE ENGINES

Відображено основні вимоги до АСУ технологічним процесом стендових випробувань газотурбінних двигунів. Освітлені проблемні питання, що виникли при інформаційному і математичному забезпеченні процесів розробки і експлуатації АСУ стендовими випробуваннями, і обґрунтовані дороги їх рішення. Приведені пропонувані рішення по архітектурі і складу апаратної і програмної частини засобів модельної підтримки, призначених для забезпечення розробки вказаних АСУ. Запропоновані варіанти підвищення адекватності математичної моделі та досягнення відповідності конкретному екземпляру двигуна. Визначені перспективи подальших досліджень.

Стендові випробування, автоматизована система управління, модельна підтримка, індивідуальна динамічна математична модель

The main requirements to ACS of technologic process of aviation engine stand test are shown. Problem questions, arising up at the informative and mathematical providing of ACS development and exploitation are lighted up, and the ways of their decision are grounded. Solutions on architecture and composition of hardware and programmatic part of model support facilities intended for providing of development of indicated to ACS are resulted. The variants of raising the level of mathematical model adequacy and achievement of correspondence to the engine specific example are proposed. Future investigation prospects are determined.

Stand tests, CAS of management, model support, individual dynamic mathematical model