

УДК 681.5.015

Г.И. ПОГОРЕЛОВ<sup>1</sup>, А.И. АБДУЛНАГИМОВ<sup>2</sup>, А.Г. ГОДОВАНЮК<sup>1</sup><sup>1</sup> *ОАО Уфимское научно-производственное предприятие «Молния», Россия*<sup>2</sup> *Уфимский государственный авиационный технический университет, Россия*

## ТЕХНОЛОГИЯ ПОЛУНАТУРНОГО КОМПЛЕКСНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ГТД И ЕГО СИСТЕМ<sup>1</sup>

*Обсуждается технология полунатурного комплексного моделирования газотурбинных двигателей и его систем, которая дает возможность проведения комплексных испытаний систем управления и контроля, включая моделирование отказов, с помощью имитационных моделей двигателя, датчиков, исполнительных механизмов и самолетных систем. Технология описывает весь процесс моделирования и проведения экспериментальных исследований – от реализации математических моделей элементов ГТД и его систем до их испытаний на стендах. Предложены методики испытаний и требования к стендам полунатурного моделирования для увеличения глубины и повышения надежности испытаний систем автоматического управления, а также возможности проведения удаленных исследований и моделирования отказов двигателя, датчиков, исполнительных механизмов и самолетных систем.*

**Ключевые слова:** полунатурные испытания, газотурбинные двигатели, система автоматического управления, контроля и диагностики, математические модели.

### Введение

Экспериментальные исследования и моделирование газотурбинных двигателей (ГТД) и их систем являются одним из важнейших и необходимых этапов при их разработке, доводке, проверки функционирования и сертификации. Такие исследования требуют создания специальной технологии комплексного моделирования, которая позволяет подтверждать надежность, работоспособность и требуемые характеристики систем до установки их на двигатель или самолет. Наличие такого подхода позволяет сократить объем и сроки дорогостоящих испытаний на двигателе и самолете.

Технология полунатурного комплексного моделирования ГТД и его систем должна обеспечивать проведение всего комплекса испытаний в реальном масштабе времени за счет сопряжения реальной системы автоматического управления, контроля и диагностики (САУКиД), в том числе систем типа FADEC<sup>2</sup>, с математическими моделями ГТД и его отдельных систем, например, газогенератора, масляной, топливной систем и других. В объем испытаний должны входить специальные, доводочные, ресурсные и сертификационные испытания как самих ГТД,

так и автономные испытания систем и узлов, определенные техническими условиями, конструкторской и технологической документацией [1 – 5].

Одной из наиболее важных и актуальных проблем является обеспечение адекватности полунатурной модели газотурбинной силовой установки и элементов САУКиД, реальной силовой установке (в том числе и при наличии отказов). Кроме того, одновременная работа алгоритмов управления, контроля и диагностики может приводить к различным «коллизиям», которые необходимо моделировать и учитывать при проектировании и доводке системы «ГТД + системы ГТД + САУКиД».

Предлагается технология полунатурного комплексного моделирования ГТД и его систем, представляющая собой совокупность методов моделирования, методик испытаний, комплекса программных и аппаратных средств в составе универсального полунатурного моделирующего стенда. Данная технология отличается большим разнообразием структур и наличием большого количества универсальных аппаратных и программных решений, особенно что касается системы имитации физических сигналов датчиков и исполнительных механизмов САУКиД.

### 1. Математическое моделирование ГТД и его систем

Инструментальным средством полунатурных исследований при создании системы «ГТД + САУКиД» являются математические модели и полунатурные моделирующие стенды и комплексы. Техно-

<sup>1</sup> Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант №12-08-31279).

<sup>2</sup> FADEC - Full Authority Digital Engine Control System (электронно-цифровая система управления двигателем с полной ответственностью).

логия полунатурного комплексного моделирования при создании САУКиД предусматривает два уровня моделирования – нижний и верхний. Нижний уровень включает в себя полунатурные модели ГТД и исполнительные системы САУКиД. Верхний уровень составляют информационные модели самолетных систем, связанных с САУКиД по каналам информационного обмена, при этом их линии связи – это физические модели реального оборудования. На этом уровне имитируются самолетные системы, взаимодействующие с САУКиД по каналу информационного обмена, а также выполняются функции контрольно-проверочной аппаратуры, взаимодействующей с САУКиД.

При этом ГТД и исполнительные системы САУКиД, представляются в виде математических линейных и нелинейных моделей реального времени, включающие следующие подсистемы:

- САУКиД (вычислительная модель или натурный блок):
  - топливную;
  - пусковую;
  - воздушную;
  - смазки и суфлирования;
  - гидравлическую;
  - дренажную и др.

Возможная структура взаимодействия модели ГТД и САУ представлена на рис. 1.

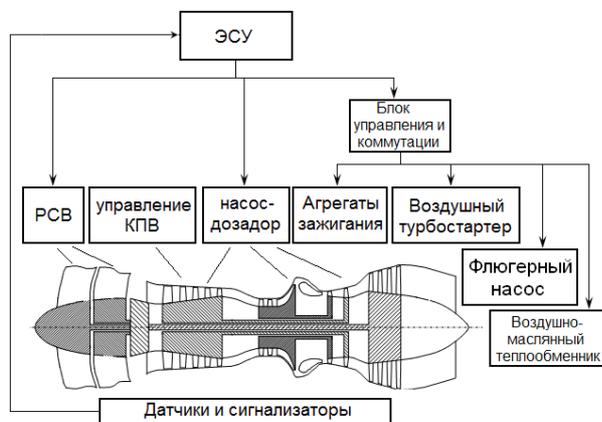


Рис. 1. Структура ТВД и САУ, элементы которой описывают соответствующие математические модели

На рис. 2 и 3 приводится реализация упрощенной математической модели (ММ) соосного винтовентилятора, входящей в состав ММ ТВД (см. рис. 1 и 6) [10].

Данная модель может быть при необходимости преобразована в модель ТВаД (турбовальный двигатель), где в качестве нагрузки будет присутствовать воздушный винт вертолета.

На начальном этапе САУКиД исследуется в виде вычислительной модели, а в дальнейшем – в качестве натурального блока. Модели указанных подсистем в универсальном стенде полунатурного моделирования (УСПМ) представляют собой комбинацию физических моделей соответствующих датчиков и исполнительных механизмов САУКиД и математической (линейной, кусочно-линейной) модели гидродневомеханической исполнительный части в реальном времени.

Как пример проведения испытаний на УСПМ [10] можно привести имитацию работы двигателя на режиме полетный малый газ (ПМГ) при посадке самолета со скорости 330 км/ч до полной остановки самолета на взлетно-посадочной полосе (ВПП) длиной 900 метров с переводом лопастей на режимы обратной тяги при рабочем и отключенном блоке электронной системы управления (ЭСУ), см. рис. 4.

Процесс последовательной разработки полунатурных моделей ГТД и его систем разделяется на следующие основные этапы [6 – 9]:

- формулирование проблемы: описание исследуемой проблемы и определение целей исследования;
- разработка модели: логико-математическое описание моделируемой системы в соответствии с формулировкой проблемы;
- подготовка данных: идентификация, спецификация и сбор данных;
- трансляция модели: перевод модели на язык, приемлемый для используемой ЭВМ;
- верификация: установление правильности машинных программ;
- валидация: оценка соответствия требуемой точности имитационной модели реальной системе;
- стратегическое и тактическое планирование: определение условий проведения машинного эксперимента с имитационной моделью;
- экспериментирование: прогон имитационной модели на ЭВМ для получения требуемой информации;
- анализ результатов: изучение результатов имитационного эксперимента для подготовки выводов и рекомендаций по решению проблемы;
- реализация и документирование: реализация рекомендаций, полученных на основе имитации, и составление документации по модели и ее использованию.

Программное обеспечение для работы с САУКиД может быть реализовано в пакете NI LabView. Модель ГТД реализуются в среде NI LabView. На рис. 5 представлена схема взаимодействия САУКиД и ММ ГТД на УСПМ [10].

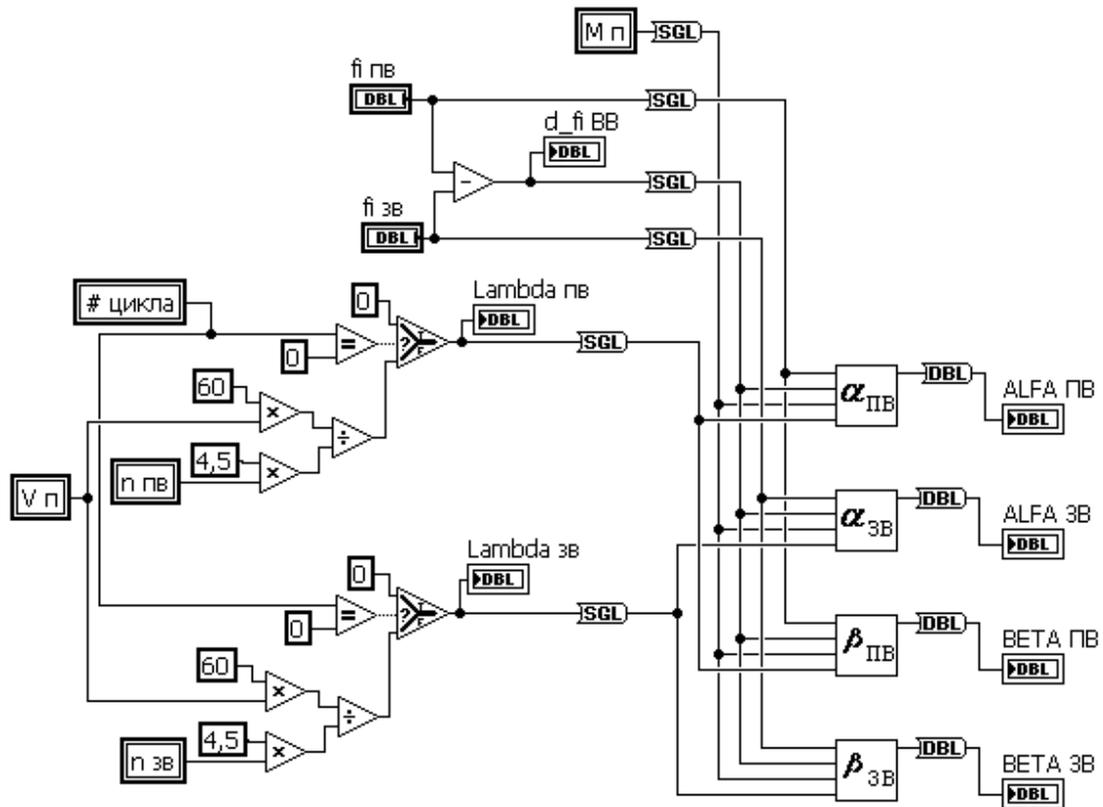


Рис. 2. Реализация математической модели ТВВД в среде NI LabVIEW.  
 Определение параметров:  $\lambda_{зв}$ ,  $\lambda_{пв}$ ,  $\Delta\varphi_B$ ,  $\alpha_{пв}$ ,  $\alpha_{зв}$ ,  $\beta_{пв}$ ,  $\beta_{зв}$

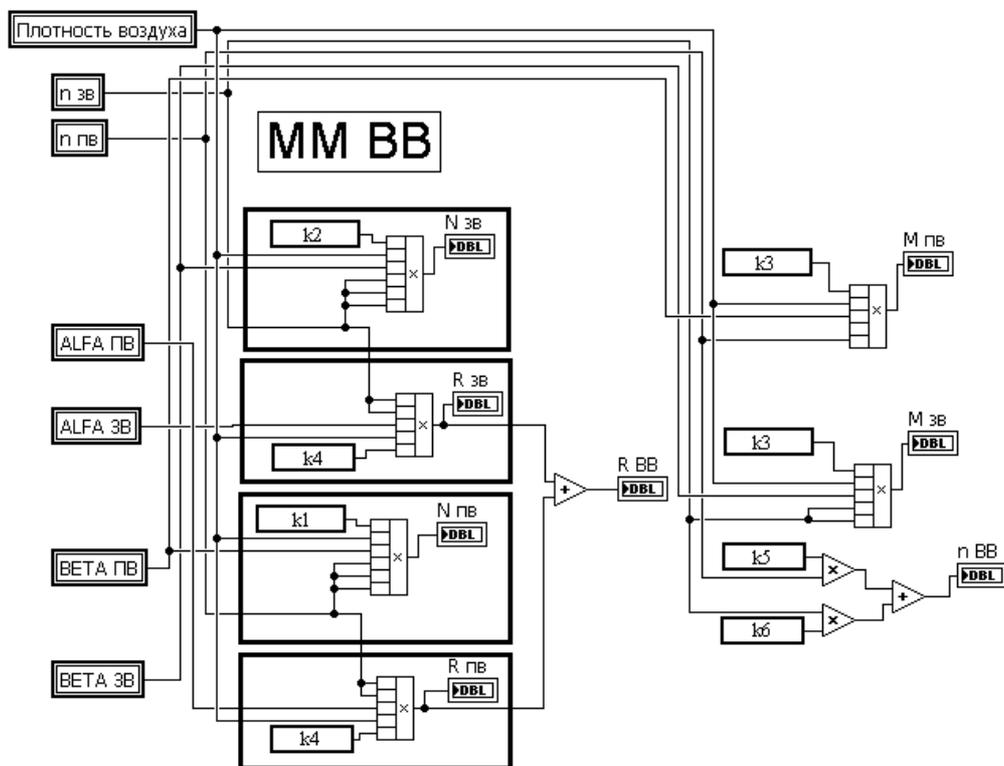


Рис. 3. Реализация математической модели ТВВД в среде NI LabVIEW.  
 Определение параметров:  $R_{пв}$ ,  $R_{зв}$ ,  $R_{вв}$ ,  $N_{пв}$ ,  $N_{зв}$ ,  $M_{пв}$ ,  $M_{зв}$ ,  $n_{вв}$

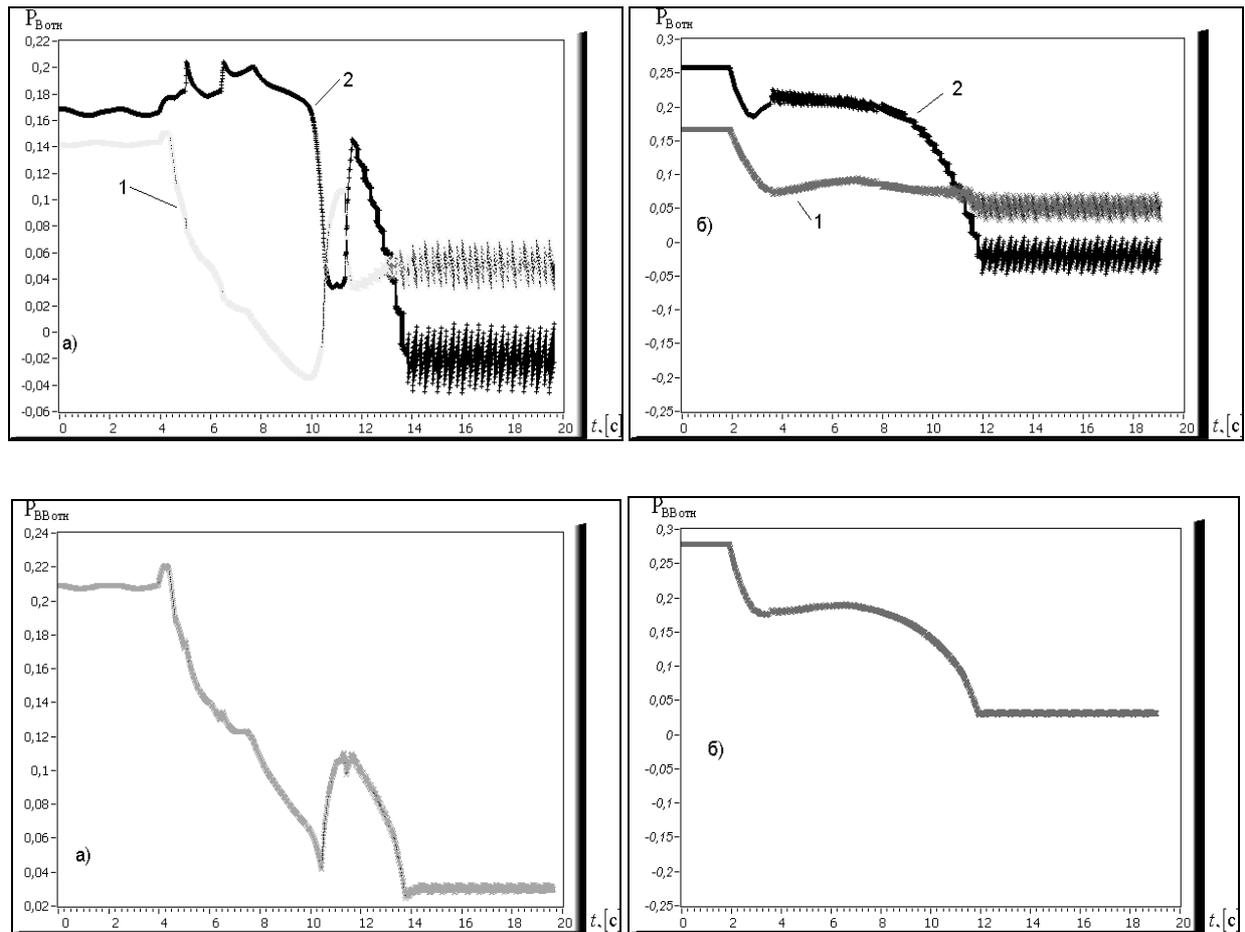


Рис. 4. Имитация переходного процесса на режиме ПМГ – имитация режима «Реверс». Изменение коэффициента тяги относительной тяги  $P_{Вотн}$  переднего (1) и заднего (2) винта, относительной тяги ВВ  $P_{ВВотн}$  при отключенном блоке ЭСУ:  
 а – с использованием АДХ ВВ по действующей методике;  
 б – с использованием АДХ ВВ по предлагаемой методике [10]

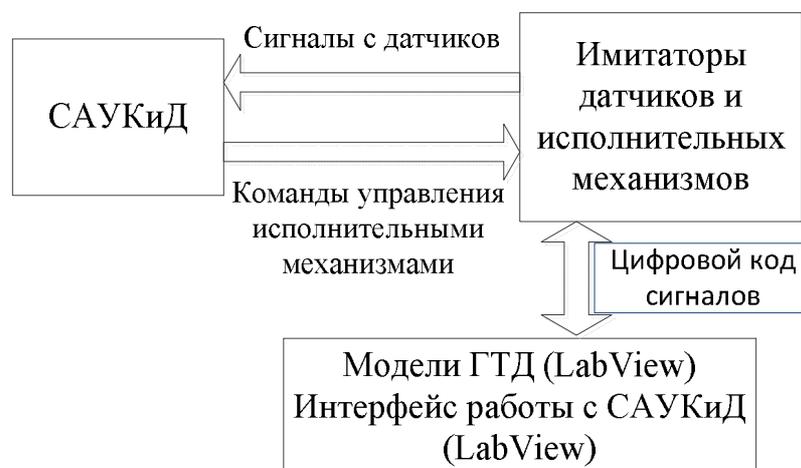


Рис. 5. Структурная схема взаимодействия имитаторов, моделей и САУКиД на УСПМ

Например, моделирование ГТД может производиться путем определения производной  $\dot{x}$  и интегрирования полученной производной, что соответствует моделированию системы дифференциальных уравнений в пространстве состояний:

$$\dot{x} = Ax(t) + Bu(t).$$

В качестве переменных  $x$  могут выступать частоты вращения роторов турбокомпрессора и винтовентилятора, а в качестве управляющих воздействий  $u$  – расход топлива, углы установки лопастей винтов и т.п.

На рис. 6 приведена схема потока входных/выходных параметров модели ГТД при работе с САУКиД на УСПМ. Наличие в составе УСПМ системы имитации отказов линий делает его наиболее целесообразным инструментальным средством создания и полунатурного исследования комплексной модели «двигатель + САУКиД» при системных отказах.

Кроме того, каждая из моделей характеризуется следующими классами состояний:

- исправным состоянием («штатному» функционированию);
- деградацией системы;
- отказным ситуациям;
- реконфигурации системы и работе на безопасном режиме.

## 2. Универсальный стенд полунатурного моделирования

Универсальный стенд полунатурного моделирования предназначен для автономной отработки следующих функций САУКиД двигательных установок (ДУ) [1 – 5]:

- управления параметрами и элементами сис-

тем ДУ;

- формирования выходных дискретных команд;
- встроенной системы контроля;
- контроля и диагностики технического состояния ГТД или двигательной установки (ДУ);
- автономной системы защиты ГТД;
- взаимодействия с системами верхнего уровня (системой управления и контроля силовой установки, системой управления общесамолетным оборудованием, автоматизированной системой управления газоперекачивающей установкой и т.д.) по каналам информационного обмена;

- проверки функционирования блока САУКиД.

Универсальность стенда заключается в том, что он может быть адаптирован для исследования любой САУ, вне зависимости от архитектуры, структуры элементов и их взаимосвязей.

УСПМ состоит из двух систем:

- системы полунатурного моделирования САУКиД ДУ;
- системы информационного моделирования (СИМ) систем верхнего уровня, взаимодействующих с блоком ЭСУ.

УСПМ обеспечивает подключение блока ЭСУ в соответствии со схемой подключения ЭСУ на двигателе. Конструктивное решение и функциональная схема устройства имитации обрывов и коротких замыканий согласовывается на стадии технического проектирования.

При разработке и изготовлении систем УСПМ комплекса должны быть предусмотрены меры по защите от влияния промышленных помех. Учитываются требования к метрологическому обеспечению УСПМ:

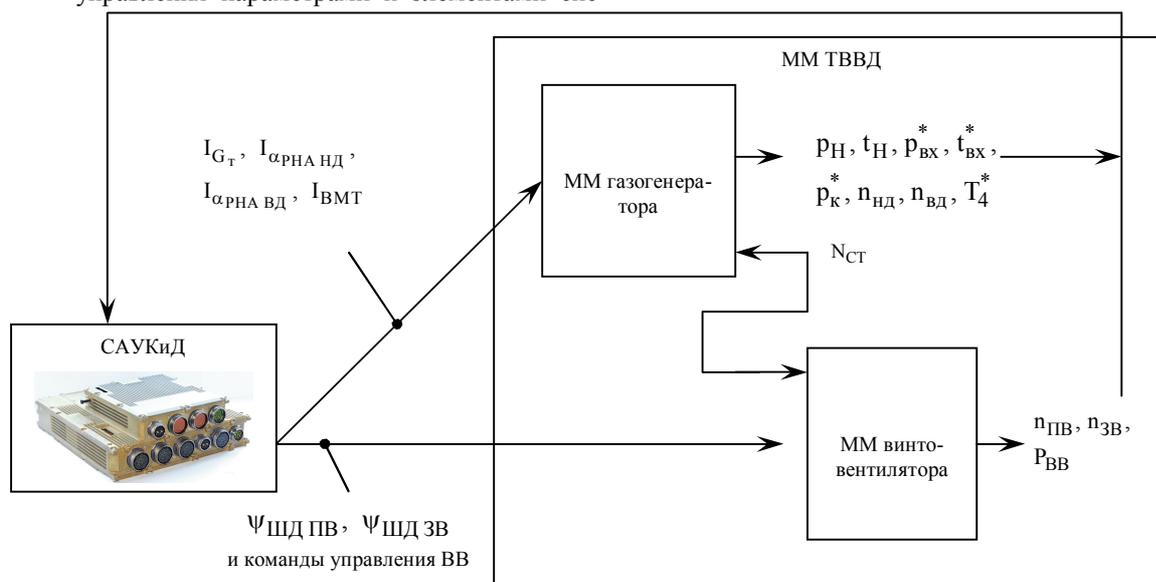


Рис. 6. Пример структуры модели ТВВД реализованной в схеме потока входных/выходных параметров при работе с САУКиД на УСПМ

– метрологическая аттестация УСПМ (кроме комплекса имитаторов сигналов) проводится по тестпрограммам. Метрологическая аттестация комплекса имитаторов сигналов проводится в соответствии с программой и методикой по ОСТ 1 00449-82. Программа и методика включена в комплект конструкторской документации.

– проверка метрологических характеристик комплекса должна производиться при нормальных атмосферных условиях по ГОСТ 22261-82.

УСПМ САУКиД ГТД обеспечивает:

- управление комплексом имитаторов;
- обмен данными между средой визуального моделирования и комплексом имитаторов;
- регистрацию выходных дискретных команд блока ЭСУ с дискретностью не более 1 мс.;
- воспроизведение характеристик объекта управления в реальном масштабе времени.

Система информационного моделирования систем верхнего уровня (СВУ) выполняет в УСПМ функции отработки взаимодействия блоков ЭСУ с системами верхнего уровня (системой управления и контроля силовой установки, системой управления общесамолетным оборудованием, автоматизированной системой управления газоперекачивающей установкой и т.д.) по каналам информационного обмена.

Также система информационного моделирования САУ ДУ обеспечивает возможность:

- формирования информационных потоков взаимодействующих с ЭСУ систем и блоков СВУ в соответствии с протоколами информационного обмена;
- моделирования связей СВУ с блоком ЭСУ с сохранением структуры, стандартов, линий передач и коммутирующих устройств, аналогичных данной СВУ.

Одной из основных задач при испытаниях на стендах является максимально точное воспроизведение условий эксплуатации по температуре, давлению и расходу рабочей среды, внешним условиям (температуре, давлению, влажности) и внешним вибрационным и электромагнитным возмущающим воздействиям. Наибольшая достоверность достигается при комплексном воздействии перечисленных факторов.

Важное место при отработке САУКиД занимают испытания на подтверждение заданных показателей надежности и ресурса.

При проведении стендовых испытаний решаются следующие основные задачи:

- проверка и получение характеристик САУ в соответствии с техническим заданием;
- проверка работоспособности и живучести в специальных и экстремальных условиях работы (при имитации возможных отказов и аварийных ситуаций, в том числе при воздействиях, превосходящих по параметрам условия эксплуатации);
- проверка работоспособности и надежности при неблагоприятном сочетании конструктивных допусков и условий эксплуатации;
- настройка агрегатов для проведения дальнейших работ на двигателе;
- подтверждение надежности и ресурса;
- сертификация систем и агрегатов.

На рис. 7 приведена схема универсального стенда полунатурного моделирования для испытаний САУКиД ГТД. Предлагаемая структура полунатурного стенда включает устройство информационного моделирования самолетных систем (УИМСС), блоки САУКиД, преобразователи сигналов исполнительных механизмов (ИМ), модели газотурбинных двигателей, имитаторы датчиков, информационно-измерительную систему, систему управления стендом, а также модуль автоматизированного включения отказов.

Другие бортовые системы, такие, как пилотажно-навигационный комплекс и остальные САУКД (для многодвигательной силовой установки), имитируются с помощью информационных потоков.

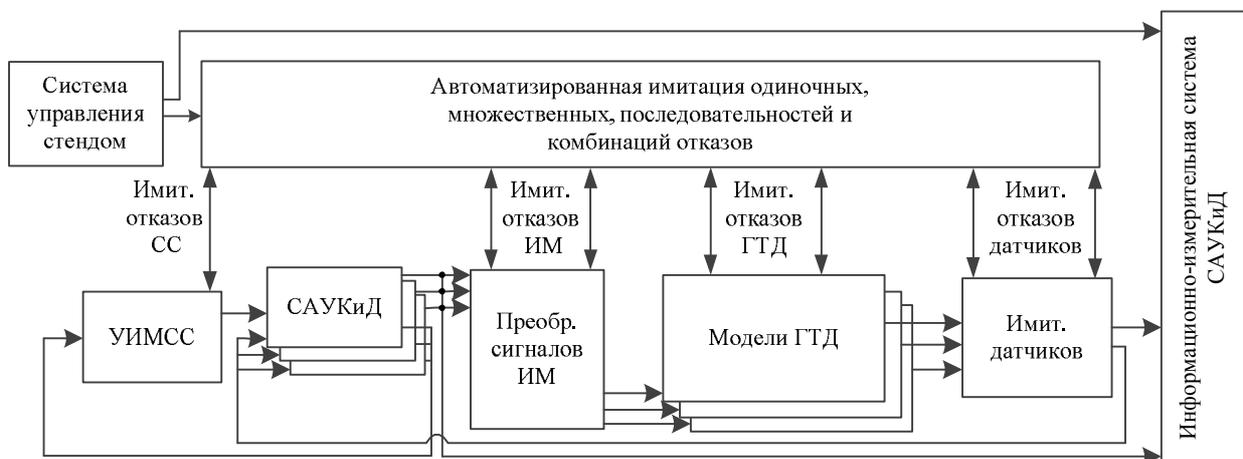


Рис. 7. Схема универсального стенда полунатурного моделирования САУКиД ГТД

Система управления стендом и логика включения отказов позволяют активизировать соответствующие переключения на стенде и имитировать исправное состояние и различные отказы датчиков и ИМ (например, переменный и постоянный обрыв провода, переменное и постоянное короткое замыкание), а также двигателя.

Стенд позволяет проводить испытания САУКиД ГТД и его систем с номинальным качеством и оптимальными затратами. Это оборудование обеспечивает весь объем исследовательских и доводочных испытаний основных узлов, блоков и систем силовых установок при опытно-конструкторских работах.

### 3. Методика испытаний САУКиД

Технология полунатурного комплексного моделирования включает в себя методику проведения испытаний на УСПМ, которая позволяет:

- комплексировать ПО и программные средства (проверять взаимодействие программного обеспечения с аппаратным в режиме замкнутых контуров);
- проверять и отрабатывать алгоритмы управления, контроля и диагностики (проводить верификацию и валидацию ПО ЭСУ);
- проводить адаптацию моделей с учетом деградации характеристик узлов.

Для этого составляется программа испытаний на проведение определенного вида работ. УСПМ работает в составе распределенной сети (рис. 8), которая позволяет, используя глобальную сеть Internet, проводить эксперименты на удаленном моторном или винтовом стенде, или проводить испытания ЭСУ, используя полетные данные с самолета. Сторонним участникам предоставляется возможность наблюдать за испытаниями, либо ограниченно участвовать в их проведении, получая удаленный доступ через сервер многоканальных подключений. Данные по испытаниям записываются в специаль-

ную распределенную базу данных и хранятся там для последующего анализа и обработки посредством специального сервера.

В целом УСПМ обеспечивает:

- обработку алгоритмов контроля и диагностики силовой установки совместно с моделями имитации отказов двигателя и его систем – элементов ГТД, механизации турбокомпрессора, топливных, масляных и др. систем и агрегатов;
- получение данных для оптимизации технических и алгоритмических решений контроля и диагностики.

Для более полного исследования работы САУКиД проводятся автоматизированные испытания по заранее составленному «расписанию» включения имитаторов отказов.

Предварительно составляется «расписание» испытаний на основе иерархических нечетких марковских моделей процессов развития отказов. Иерархическая модель содержит нечеткие правила оценки состояния с учетом степени деградации и коэффициенты влияния отказов. Имитация отказов различных элементов системы осуществляется путем внесения изменений выходного сигнала модели в автоматизированном режиме в соответствии с расписанием (циклограммой).

Расписание формируется на основе целей и задач испытаний (с учетом требований ТЗ). Формируется таблица, описывающая последовательность имитации отказов, где указаны наименования отказов, время включения, время задержки между отказами. Здесь же проверяются ожидаемые значения выходных параметров.

Кроме того, формируются последовательности (комбинации) отказов, которые также заносятся в расписание испытаний. Между моментами включения имитации отказов предусматривается время для регистрации отказного состояния, а также для наблюдения последующей реакции системы.



Рис. 8. Фрагмент схемы удаленного подключения к УСПМ

Также учитывается, что ряд отказов приводит к отключению отдельных каналов измерения и регулирования САУКиД, после чего дальнейшая проверка отключенных подсистем становится невозможной. В этом случае, отказавший элемент или канал САУКиД считается неисправным, даже если через некоторое время его работоспособность восстановилась. Для восстановления исходного состояния требуется перезагрузка бортовой цифровой вычислительной машины, которая требует дополнительных затрат времени.

С учетом этого оптимизируется «расписание» включения имитации отказов для снижения доли ручных операций в процессе полунатурных испытаний (рис. 9).

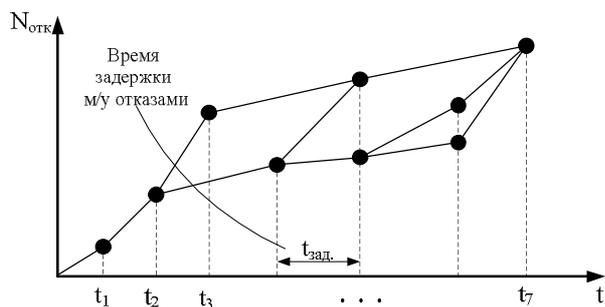


Рис. 9. Расписание испытаний (последовательность включения имитаторов отказов)

План испытаний рассматривается как последовательность включения имитаторов отказов, причем взаимное влияние отказов описывается иерархической моделью процессов развития отказов, а оптимизация плана испытаний по критерию минимальной продолжительности может осуществляться путем полного перебора вариантов.

В процессе имитации отказов формируется протокол испытаний. В протоколе фиксируется информация о реакции системы контроля при обнаружении отказов.

Рассмотрим пример имитации отказа на УСПМ. При работе контура регулирования расхода топлива был имитирован отказ исполнительного механизма расхода топлива JGт в канале А (рис.10). Встроенная система контроля регулятора обнаружила отказ и выдала сообщение об отказе канала А. Затем САУКиД перешла на резервный канал Б, заглушив колебания в расходе топлива.

Через некоторое время был имитирован отказ исполнительного механизма расхода топлива JGтБ в канале Б, после чего система контроля выдала сообщение об отказе канала Б и интегральном отказе ИМ. После этого система переключилась на резервную гидромеханическую систему управления.

Таким образом, использование предлагаемой технологии полунатурного комплексного моделирования ГТД и его систем:

- позволяет моделировать как одиночные, так и

множественные отказы датчиков, исполнительных механизмов, двигателя и самолетных систем при полунатурных испытаниях САУКиД ГТД;

- проводить верификацию и валидацию моделей ГТД и его систем, а также алгоритмов управления, контроля и диагностики в блоках ЭСУ;

- позволяет отслеживать траекторию развития отказов на основе иерархических марковских моделей;

- снижает объем ручных операций за счет использования «расписания» испытаний и сокращает время испытаний функций контроля в десятки раз.

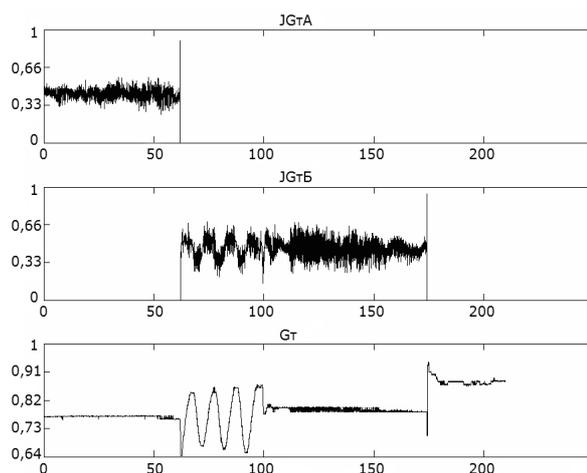


Рис. 10. Отказ ИМ расходом топлива в каналах А и Б

## Заключение

Технология полунатурного комплексного моделирования представляет собой совокупность методик разработки САУ (как анализа, так и синтеза) и их требований к стендам моделирования для обеспечения экспериментальных работ. Данная технология позволяет моделировать и определять характеристики систем и агрегатов на установившихся и переходных режимах работы в замкнутой и разомкнутой схемах, проводить анализ располагаемых запасов устойчивости систем регулирования, выполнять обработку взаимодействия отдельных контуров и агрегатов, исследовать влияние возмущений и внешних факторов, работоспособность САУКиД при отказах. Указанные методики моделирования и испытаний доведены до промышленного и производственного уровня.

## Литература

1. Комплекс информационного и полунатурного моделирования для исследования систем автоматического управления и контроля многодвигательных силовых установок при их эксплуатации по состоянию [Текст] / В.С. Фатиков, Г.И. Позорелов, И.И. Минаев, М.Р. Азанов, С.Г. Куликов, В.П. Ищук // *Авиационно-космическая техника и технология*. – 2005. – № 2. – С. 155 – 160.

2. Теория автоматического управления силовыми установками летательных аппаратов. Управление ВРД [Текст] / под ред. А.А. Шейякова. - М.: Машиностроение, 1976. - 344 с.

3. Методология полунатурного комплексного функционального моделирования ГТД и его систем [Текст] / Г.Г. Куликов, В.Ю. Арьков, В.С. Фатилов, Г.И. Погорелов // Вестник УГАТУ. - 2009. - №2(35). - Т. 13. - С. 88 - 95.

4. Погорелов, Г.И. Автоматизированный комплекс доводки и испытаний цифровых САУ многодвигательных силовых установок самолетов [Текст]: дис... канд. техн. наук: 05.13.06; защищена 26.12.2002 / Погорелов Григорий Иванович. - Уфа, 2002. - 176 с.

5. Минаев, И.И. Автоматизация процессов испытаний интегрированных САУ многодвигательными силовыми установками летательных аппаратов [Текст]: дис... канд. техн. наук: 05.13.07 / Минаев Игорь Иванович. - Уфа, 1996. - 170 с.

6. Зарубин, В.С. Математическое моделирование в технике: учеб. для вузов [Текст] / под ред.

В.С. Зарубина, А.П. Крищенко. - М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2001. - 496 с.

7. Рыжиков, Ю.И. Имитационное моделирование. Теория и технологии [Текст] / Ю.И. Рыжиков. - М.: Альтекс-А, 2004. - 384 с.

8. Корячко, В.П. Теоретические основы САПР: учеб. для вузов [Текст] / В.П. Корячко, В.М. Курейчик, И.П. Норенков. - М.: Энергоатомиздат, 1987. - 400 с.

9. Годованюк, А.Г. Элементы контроля и управления в имитационных моделях ГТД [Текст] / А.Г. Годованюк, И.А. Кривошеев, Д.А. Ахмедзянов // II Всероссийская НТК Междунар. участие: Мехатроника, автоматизация, управление (МАУ'2005): Сб. тр. - Т. 1. - Уфа: УГАТУ, 2005. - С. 33 - 38.

10. Годованюк, А.Г. Методика представления и использования многомерной характеристики винтовентилятора при полунатурном моделировании ГТД и его САУ [Текст] / А.Г. Годованюк // Изв. вузов. Авиационная техника. - 2010. - № 1. - С. 37 - 40.

Поступила в редакцию 31.05.2013, рассмотрена на редколлегии 12.06.2013

**Рецензент:** д-р техн. наук, проф., проф. кафедры технической кибернетики Р.А. Мунасыпов, Уфимский государственный авиационный технический университет, Россия.

## ТЕХНОЛОГІЯ НАПІВНАТУРНОГО КОМПЛЕКСНОГО МОДЕЛЮВАННЯ ГТД І ЙОГО СИСТЕМ

*Г.І. Погорелов, А.І. Абдулнагімов, О.Г. Годованюк*

Обговорюється технологія напівнатурного комплексного моделювання газотурбінних двигунів і його систем, яка дає можливість проведення комплексних випробувань систем управління і контролю, включаючи моделювання відмов за допомогою імітаційних моделей двигуна, датчиків, виконавчих механізмів і літакових систем. Технологія описує весь процес моделювання і проведення експериментальних досліджень – від реалізації математичних моделей елементів ГТД і його систем до їх випробувань на стендах. Запропоновано методики випробувань і вимоги до стендів напівнатурного моделювання для збільшення глибини і підвищення надійності випробувань систем автоматичного управління, а також можливості проведення віддалених досліджень і моделювання відмов двигуна, датчиків, виконавчих механізмів і літакових систем.

**Ключові слова:** напівнатурні випробування, газотурбінні двигуни, система автоматичного управління, контролю і діагностики, математичні моделі.

## HARDWARE-IN-THE-LOOP INTEGRATED SIMULATION TECHNOLOGY FOR GAS TURBINES AND ITS SYSTEMS

*G.I. Pogorelov, A.I. Abdunagimov, A.G. Godovanyuk*

The technology of HIL integrated simulation of gas turbine engines and their systems is discussed, which provides the opportunity for integrated tests for control and condition-monitoring systems, including fault modeling using simulation models of the engine, sensors, actuators, and aircraft systems. The technology describes the entire process of modeling and experimental research: from the implementation of mathematical models of gas turbine's elements and systems to the tests at the test-beds. The testing methods and requirements for the HIL-modeling test-beds are proposed to increase the depth and the reliability of tests of automatic control systems, as well as the possibility of the remote investigation and fault modeling of the engine, sensors, actuators, and aircraft systems.

**Key words:** HIL testing, gas turbine engines, automatic control, monitoring and diagnostics, mathematical models.

**Погорелов Григорий Иванович** – канд. техн. наук, заместитель генерального директора ОАО Уфимского научно-производственного предприятия «Молния», Уфа, Россия, e-mail: pogorelov@molniya-ufa.ru.

**Абдулнагимов Ансаф Ирекович** – канд. техн. наук, ст. преподаватель кафедры автоматизированных систем управления Уфимского государственного авиационного технического университета, Уфа, Россия, e-mail: ansafufa@mail.ru.

**Годованюк Алексей Геннадьевич** – канд. техн. наук, инженер-программист ОАО Уфимского научно-производственного предприятия «Молния», Уфа, Россия, e-mail: algen82@gmail.com.