

## МЕТОДОЛОГИЯ КОМПЛЕКСНОГО ПОЛУНАТУРНОГО ФУНКЦИОНАЛЬНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ГТД И ЕГО СИСТЕМ

©2009 Г. Г. Куликов<sup>1</sup>, В. Ю. Арьков<sup>1</sup>, В. С. Фатиков<sup>1</sup>,  
А. И. Абдулнагимов<sup>1</sup>, Г. И. Погорелов<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Уфимский Государственный авиационный технический университет

<sup>2</sup>Уфимское научно-производственное предприятие «Молния»

Обсуждаются проблемы построения адекватной комплексной структурной модели ГТД с целью полунатурного исследования поведения САУ при системных отказах. Предложены структура и разработана технология построения адекватной комплексной модели ГТД на примере ТРДДФ для полунатурного моделирования, включающие специальный комплекс моделей, имитирующих процессы реконфигурации системы управления, контроля и диагностики FADEC при системных отказах.

*Комплексная структурная модель, система автоматического управления, контроля и диагностики, ГТД, системные отказы, полунатурный моделирующий комплекс, модель переключения, реконфигурация*

При проектировании и доводке систем типа FADEC ГТД одной из наиболее актуальных проблем является разработка методологии и соответствующей технологии комплексного полунатурного исследования ГТД и его систем с учетом «нештатной» работы отдельных систем и подсистем авиационной газотурбинной силовой установки, то есть при системных отказах. Одновременная работа систем управления, контроля и диагностики может приводить к "коллизиям", которые необходимо учитывать при проектировании и доводке системы «ГТД + FADEC» [5].

### 1. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Главными задачами, требующими решения в плане данной проблемы, являются следующие:

- обеспечение адекватности структуры комплексной модели ГТД и его систем реальной силовой установке;
- технология комплексного моделирования системы «ГТД + FADEC» с учетом отказов в составе полунатурного моделирующего комплекса (ПМК);
- методика полунатурного исследования ГТД при системных отказах.

### Современная концепция полунатурного моделирующего комплекса (ПМК)

Основным инструментальным средством комплексных исследований системы

«ГТД + FADEC» являются полунатурные моделирующие стенды и комплексы. Современная концепция [3] полунатурного моделирующего комплекса (ПМК) предусматривает два уровня моделирования. Нижний уровень - это полунатурные модели «ГТД + FADEC» (ГТД - математическая модель реального времени, FADEC –натурный блок). Верхний уровень составляют информационные модели самолетных систем, связанных с FADEC по каналам информационного обмена, при этом их линии связи – это физические модели реальных. Наличие в составе ПМК системы имитации отказов линий делает его наиболее целесообразным инструментальным средством для полунатурного исследования комплексной модели «двигатель + FADEC» при системных отказах. Структура ПМК показана на рис. 2.

Комплексное моделирование авиационной газотурбинной силовой установки при штатной и «нештатной» работе отдельных её систем и подсистем предполагает обеспечение адекватности модели ГТД и его систем.

### Обеспечение адекватности структуры полунатурной комплексной модели «ГТД + FADEC»

Основным условием адекватности структуры полунатурной комплексной модели «двигатель + FADEC» в первую очередь является её «полнота» - соответствие реальной силовой установке по количеству моделируемых систем, функциональных

взаимодействий систем и подсистем, а также информационных и энергетических связей. К традиционной модели ГТД необходимо добавить модели систем, обеспечивающих его функционирование, а именно следующие системы [2]:

1. Автоматического управления и контроля (в составе ПМК – это натурный блок FADEC);
2. Топливная;
3. Диагностики;
4. Пусковая;
5. Воздушная;
6. Смазки и суфлирования;
7. Гидравлическая;
8. Дренажная.

Модель каждой из указанных систем в ПМК должна представлять собой комбинацию физических моделей соответствующих датчиков и исполнительных механизмов FADEC и математической (линейной, кусочно-линейной) модели гидродневмомеханической исполнительской части в реальном времени. Для комплексной модели ГТД и его систем необходимо иметь набор моделей, соответствующих трем состояниям:

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

Для газовоздушного тракта (ГВТ)

ГТД к моделируемым отказным ситуациям относятся:

- «помпаж» компрессора;
- «нерозжиг» основной камеры сгорания;
- погасание основной камеры сгорания;
- «нерозжиг» форсажной камеры сгорания;
- погасание форсажной камеры сгорания;
- открытие (закрытие) сопла на безфорсажных и форсажных режимах;
- другие.

Перечисленные отказы могут сочетаться друг с другом в различных комбинациях и временной последовательности. Это может происходить на статических и переходных режимах работы двигателя.

Также должен быть определен перечень отказных ситуаций и для каждой из систем ГТД. Состав комплексной модели

ГТД и его систем для реализации в ПМК приводится ниже в таблице.

### Технология построения адекватной структурной модели ГТД и его систем

1. Структурную модель ГТД и его систем в рамках *функционального* моделирования целесообразно представить на трех уровнях:

- **1 уровень:** Схемы агрегатирования, Спецификации. (в графических средах 3D, 2D, 1D – представления);
- **2 уровень:** модели взаимодействия подсистем (в графических средах 2D, 1D - представления);
- **3 уровень:** схемы отдельных подсистем (в средах 2D, 1D представления).

2. С другой стороны, методы системной инженерии [8], которые реализуются CALS-технологиями и стандартами качества менеджмента, в том числе и в производственных системах с полным циклом (проектирование + производство) предполагают переход от *функционального* моделирования к *процессному*. Это накладывает соответствующие требования к определению структур процессов моделирования, проектирования, испытания и др. производственных процессов. В таких системах должна соблюдаться иерархия организации системы, состоящей из подсистем. Это позволит создавать мета-модели с сетевой структурой, где будут объединены различные структуры. Построение процессных моделей для исследования функционирования систем контроля и диагностики ГТД требует разработки новых методологических подходов.

Предполагается разработать 2 класса моделей:

1. Модели отдельных подсистем (3D, 2D, 1D - представлений);
2. Модели интегрированных подсистем управления, контроля и реконфигурации (3D, 2D, 1D - представлений)

Для 3D графики и моделирования могут быть использованы программы AutoCAD, LMS Virtual.Lab и др.

Пример 3D представления схемы агрегатирования ГТД представлен на рис.1, заимствованном из [2].

3. Анализ известных организационных систем эксплуатации и ремонта показывает, что обычно процессы контроля и диагностики отдельных подсистем ГТД реализуются двумя путями. Зафиксированный системой верхнего уровня дефект локализуется в конкретном конструктивно сменном блоке (КСБ) системой встроенного контроля. [7].

Высокая степень информатизации и компьютеризации систем контроля и диагностики позволяют часть задач, которые решались наземными службами перенести на уровень борта самолета [7]. В этом слу-

чае требуется построение двух классов моделей:

- модели систем контроля и диагностики в реальном времени;
- модели систем контроля и диагностики для наземных служб.

При этом модели процессов должны отвечать условиям «прослеживаемости» (определение причин и следствий состояний отдельных систем и подсистем), что будет соответствовать требованиям стандартов ИСО 9000.

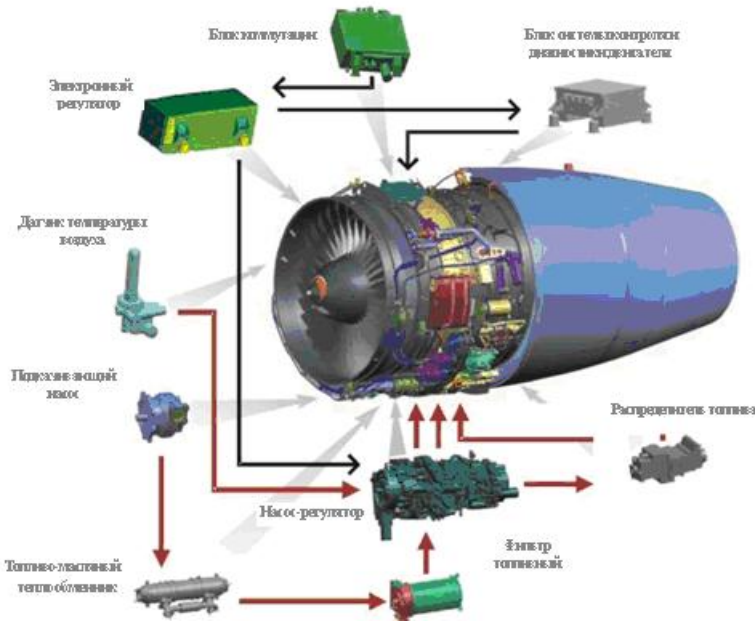


Рис. 1. Пример схемы агрегатирования системы автоматического управления, контроля и топливопитания ТРДД (из [2])

### Пример реализации комплексной модели ГТД (ТРДДФ) и его систем как объектов управления, контроля и диагностики на ПМК

Комплекс моделей ГТД как объекта управления

1. Базовая модель - поэлементная нелинейная термогазодинамическая [1, 4, 6], - моделирующая работу ГТД на штатных режимах в диапазоне применения, например, в виде:

$$\bar{X} = f(\bar{X}, \bar{V}, \bar{U});$$

$$\bar{Y} = \varphi(\bar{X}, \bar{V}, \bar{U});$$

где:  $\bar{X} = [n_i \dots]^T$  - вектор переменных состояния;

$\bar{V} = [M, H, N_{ny}, N_{omb} \dots]^T$  - вектор внешних воздействий;

$\bar{U} = [G_T, \alpha_{na}, G_{omb}, G_{TФ}, F_{pc}, \dots]^T$  - вектор управления;

$f, \varphi$  - нелинейные операторы;

$\bar{Y}$  - вектор выходных координат.

2. Кусочно-линейная всережимная модель ГТД - получают из базовой модели по известной методике [1,4,6]

3. Специальные кусочно-линейные модели ГТД:

- запуска двигателя, в том числе модель процесса зажигания;
  - запуска форсажной камеры, в том числе модель процесса воспламенения.
4. Модели ГТД для отказных ситуаций:

- «помпаж» компрессора;
  - «нерозжиг» основной камеры сгорания;
  - погасание основной камеры сгорания
  - «нерозжиг» форсажной камеры сгорания;
  - погасание форсажной камеры сгорания;
  - несанкционированное открытие (закрытие) створок реактивного сопла на безфорсажных и форсажных режимах.
5. Модели систем:
- топливной (основного и форсажного контуров): насосы и дозаторы, приводы механизации турбокомпрессора, реактивного

- сопла, коллекторы форсунок, топливные фильтры и др.
- пусковой: стартер, система подачи топлива в камеру сгорания, система зажигания, система механизации турбокомпрессора, система электропитания агрегатов;
- смазки и суфлирования;
- воздушной.
- гидравлической системы реактивного сопла
- дренажной.

Таблица - Состав комплексной модели ГТД и его систем для реализации в ПМК

ГТД и его системы	Модели нормального функционирования	Модели формирования отказных ситуаций	Модели реконфигурации системы (ГТД + FADEC )
ГТД	Базовая или кусочно-линейная	ММ имитации отказов ГТД (перечисление отказов см. выше)	Модели: – восстановления режима работы двигателя; – перехода на безопасный режим; – выключения двигателя.
FADEC-натурный блок	Алгоритмы функционирования FADEC при отсутствии отказов ГТД и его систем	– Физическое моделирование обрывов и коротких замыканий сигнальных линий датчиков и исполнительных механизмов – ММ формирования отказов ГТД и его систем для каналов контроля FADEC	– переходов на дублирующие и резервные датчики и каналы управления; резервную систему управления; – выключения и восстановления режима работы двигателя.
Топливная система; Топливная система форсажной камеры.	Нелинейные, кусочно-линейные ММ (с основными нелинейностями)	– Физическое моделирование отказов цепей датчиков и исполнительных механизмов, – ММ формирования отказов агрегатов, приводов, коллекторов, фильтров по контролируемым параметрам – ММ розжига на земле и в полете	– исполнительных частей дублирующего, резервного канала управления, резервной системы управления – выключения форсажной камеры – переходов на безфорсажный режим (штатного и аварийного).
Система запуска	– ММ подсистемы управления стартером; – ПМ системы зажигания	ММ формирования отказов по контролируемым параметрам подсистем управления стартером, систем зажигания, розжига, топливной системы.	Модели запуска ГТД в ожидаемых условиях эксплуатации
Система смазки и суфлирования;	Имитационная ММ по контролируемым параметрам	1.ММ формирования отказов системы по контролируемым параметрам: – количеству масла в баке; – температуре и давлению на входе в двигатель, в полостях опор двигателя; 2. Физические модели (имитаторы) датчиков и сигнализаторов наличия стружки, перегрева масла в опорах турбин, компрессоров, центрального привода и коробки приводов; засорения маслофильтра	Модели перехода на безопасный режим.
Системы воздушные, гидравлические, дренажные	аналогично системам смазки и суфлирования	аналогично системам смазки и суфлирования	аналогично системам смазки и суфлирования

*Комплекс моделей ГТД и его систем как объектов контроля и диагностики*

Модели ГТД и его систем как объектов контроля и диагностики в составе ПМК предназначены для имитации условий и значений параметров, обеспечивающих включение и выключение проверяемых алгоритмов контроля и диагностики. При этом достигается цель проверки реакции FADEC, то есть выдачи соответствующих сообщений в информационную модель самолетных систем и (или) в модели переключения для реконфигурации.

В частности, это модели и алгоритмы:

- непрерывного контроля в полете параметров и сигналов;
- контроля предельно-допустимых значений параметров по фиксированным и изменяемым, в зависимости от режимов работы двигателя, границам;
- идентификации режимов работы двигателя для учета выработки ресурса двигателя;
- подготовки данных в обеспечение наземного контроля и прогнозирования технического состояния проточной части двигателя по трендам основных параметров;
- контроля наработки двигателя на режимах ограничения и общей наработки в часах и полетных циклах;
- обработки диагностической информации для обеспечения наземного контроля выработки ресурса деталей двигателя, лимитирующих его ресурс по малоцикловой усталости и длительной прочности;
- контроля процесса запуска, останова двигателя
- контроля процесса включения, работы и выключения форсажной камеры;
- контроля параметров двигателя на соответствие нормам на взлетных режимах;
- формирования и выдачи в бортовые системы самолета обобщенных сигналов о выявленных неисправностях по двигателю и его системам.
- другие.

Состав комплексной модели ГТД и его систем приведен в таблице.

Концепция аппаратного, алгоритмического и программного обеспечения автоматизированного комплекса информационного

и полунатурного моделирования систем FADEC на всех этапах жизненного цикла рассмотрены в [2]. Аппаратная часть ПМК (процессоры, память, преобразователи, коммутационные панели, имитаторы датчиков, исполнительных механизмов, отказов линий связи и др.) собрана из стандартного промышленного компьютерного оборудования, ориентированного на работу в реальном времени. Модели двигателя и его систем в исправном состоянии и модели отказов создаются средствами визуального моделирования типа LabView и VisSim.

Данная система обеспечивает дополнительные возможности:

- 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, диагностики и реконфигурации FADEC.

На рис 2. приведена структурная схема ПМК, позволяющая реализовать комплексную модель ГТД и его систем в составе многодвигательной силовой установки самолета, то есть весь перечень моделей согласно табл.2 и, кроме того, информационные модели других ГТД и взаимодействующих с FADEC самолетных систем [3].

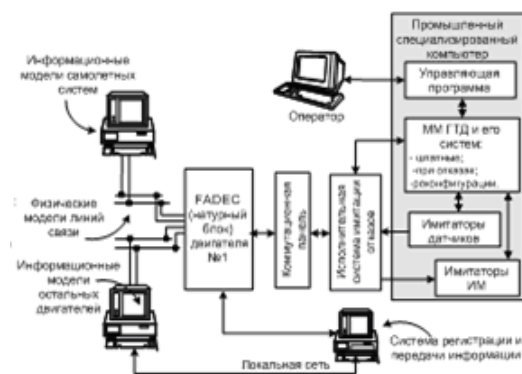


Рис.2. Структурная схема ПМК, реализующего комплексную модель ГТД и его систем в составе многодвигательной силовой установки самолета

**Полунатурное моделирование отказов ГТД и его систем**

Задачей системы полунатурного моделирования отказов ГТД и его систем в соста-

ве КПМ является моделирование как оди-  
ночных, так и «следственных» отказов, то  
есть автоматического включения отказов  
двигателя, его систем, датчиков и испол-  
нительных механизмов в заданной последо-  
вательности. Динамика ГТД и его систем в  
случае имитации  $i$ -го отказа моделируется с  
помощью дифференциального уравнения:

$$\dot{x} = (A + \Delta_i A)x(t) + (B + \Delta_i B)u(t).$$

Выходной сигнал определяется в сле-  
дующем виде:

$$x(t) = \int_0^t [(A + \Delta_i A)x(t) + (B + \Delta_i B)u(t)] dt.$$

То есть, отказы двигателя и его систем  
моделируются путем изменения коэффици-  
ентов динамических моделей. Для внезап-  
ных отказов – это скачкообразное изменение  
коэффициента  $A$  на величины  $\Delta A$ ,  $B$  на  $\Delta B$ .  
Величина этих скачков определяется заран-  
ее по модели двигателя и его систем для  
каждого отказа. Например, в случае обрыва  
лопатки компрессора снижается КПД ком-  
прессора, что выражается в соответствующем  
изменении коэффициентов  $\Delta A$  и  $\Delta B$  в  
динамической модели. Другие отказы дви-  
гателя, например, прогорание камеры сгора-  
ния или разрушение лопатки турбины при-  
водит к другим изменениям коэффициентов  
 $\Delta A$  и  $\Delta B$ . Аналогично определяются отказы  
и в моделях систем двигателя.

Исполнительная система имитации от-  
казов (см. рис 2.) физически имитирует: об-  
рыв; замыкание входной электрической це-  
пи имитатора исполнительного механизма;  
фиксации положения исполнительного ме-  
ханизма; имитации движения исполнитель-  
ного механизма с постоянной скоростью до  
положения ограничения. Также в исполни-  
тельной системе физически имитируются;  
обрыв; короткое замыкание выходной элек-  
трической цепи имитатора датчика. Логика  
переключения ключей для имитации отказов  
датчиков, исполнительных механизмов и  
двигателя задает оператор с помощью  
 $k(n+6)$  признаков в программно управле-  
мом наборном поле [9]. При работе контура  
регулирования частоты вращения ротора  
низкого давления  $n_{нд}$  был имитирован обрыв  
цепи датчика  $n_{нд}$  в момент времени  $t_1$ , см.  
рис.9. Встроенная система контроля регуля-  
тора обнаружила обрыв и выдала дискрет-

ный сигнал "обрыв датчика"  $SF$ , см. рис.4.  
Далее был сформирован сигнал "отказ изме-  
рительного канала"  $MF$ . В процессе париро-  
вания отказа произошла реконфигурация  
FADEC с переходом на регулирование сте-  
пени повышения давления ( $N_{ch}$  на рис.4). В  
момент времени  $t_3$  была восстановлена элек-  
трическая цепь отказавшего датчика. Вос-  
становление датчика было обнаружено  
встроенной системой контроля (ВСК), но  
структура FADEC не изменилась (в соответ-  
ствии с логикой данной FADEC). В процессе  
парирования отказа значение частоты вра-  
щения с отказавшего датчика было "зафик-  
сировано" на уровне последнего надежного  
измерения  $n_{нд}$  на период отказа  $T = t_1 \dots t_3$ .  
Примеры экспериментальных данных при  
испытаниях на ПМК даются на рис.3, 4. [5]

В процессе реконфигурации наблюда-  
ется переходной процесс по расходу топлива  
 $Gm$  и частоте вращения ротора высокого  
давления  $n_{вд}$  на рис.3.

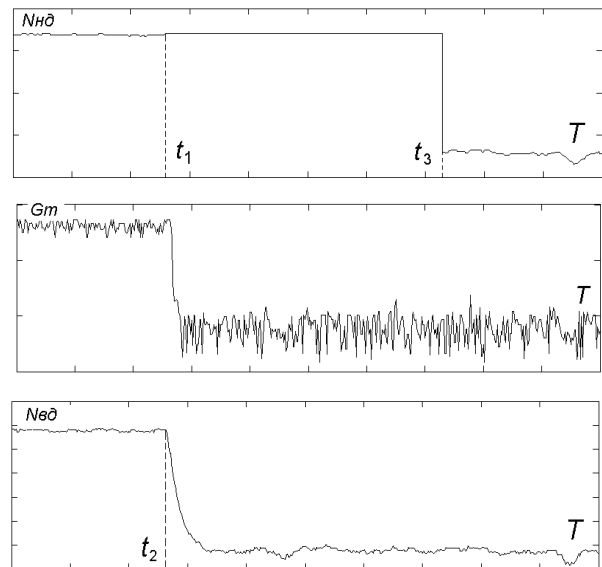


Рис. 3. Измеренные значения параметров

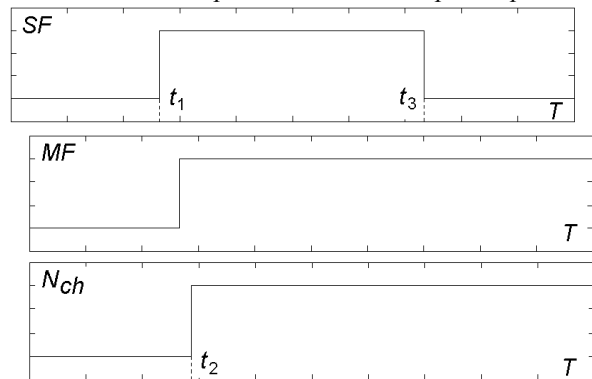


Рис. 4. Дискретные сигналы при реконфигурации

Причина – расхождение в настройках "задатчиков" разных каналов регулирования, выявление которой представляет собой дополнительный результат совместной отработки алгоритмов управления и контроля FADEC на КПП.

Таким же образом можно выявить и все другие несоответствия в алгоритмах и отработать их на ПМК.

### **ВЫВОДЫ**

1. Разработаны подход и методология полунатурного исследования ГТД и его систем при отказах, основанные на построении комплекса моделей, соответствующих нормальному функционированию, наличию отказов и режимам реконфигурации системы управления, контроля и диагностики (FADEC)

2. Рассмотренный подход позволяет обеспечить выполнение условий «прослеживаемости» (определение причин и следствий состояний отдельных систем и подсистем ГТД), что позволяет решать обратную задачу при контроле и диагностике: имея факт отказа проследить влияние его на системы и подсистемы

### **Библиографический список**

1. Куликов, Г.Г. Математические модели, используемые в САПР двигателя и систем управления // Б.А. Черкасов. Автоматика и регулирование реактивных двигателей.– М.: Машиностроение, 1988.– С. 323-343.

2. Иноземцев, А.А. Автоматика и регулирование авиационных двигателей и энергетических установок. учеб./А.А. Иноземцев, М.А. Нихамкин, В.Л. Сандрацкий.- М.: Машиностроение, 2008.-Т.5.-187с. (Серия: Газотурбинные двигатели).

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

4. Распопов, Е.В. Интеллектуальная система запуска для нового поколения авиационных ГТД / Е.В. Распопов [и др.] // Вестник УГАТУ, 2007.- Т.9, № 2(20).- С.153-157.

5. Арьков, В.Ю. Полунатурное моделирование отказов ГТД для испытаний систем контроля и диагностики двигателя ей / В.Ю. Арьков, Г.Г. Куликов, С.В. Епифанов, И.И. Минаев // Авиационно-космическая техника и технология.- №7(15), 2004.– С.167–173.

6. Kulikov G., Arkov V., Lyantsev O., et al. Dynamic Modeling Of Gas Turbines / G. Kulikov, H.A. Thompson, eds. Springer-Verlag, New York, 2004, 309

7. Kulikov G.G., Kotenko P.S., Fatikov V.S., Pogorelov G.I. Intelligent information technologies for control and diagnostics of gas turbine engines and their systems at all stages of their life cycle // Proc. AMETMAS-NOE Int. Workshop on Problems of Technology Transfer, Ufa, 1999. P.121-124.

8. ГОСТ Р ИСО/МЭК 15288-2005 Информационная технология. Системная инженерия. Процессы жизненного цикла систем.

9. Куликов, Г.Г. Способ полунатурных испытаний систем автоматического управления и контроля газотурбинных двигателей и стенд для его реализации / Г.Г. Куликов, Г.И. Погорелов, В.Ю. Арьков, В.С. Фатиков, М.Р. Азанов, С.В. Епифанов/. Пат. 2340883 Российская Федерация, МПК G01M 15/14. №2007118610/06, заявл. 18.05.2007; опубл. 10.12.2008, Бюл. №34; Приор. 18.05.2007, №2007118610 (Российская Федерация). - Введ. с 10.12.2008 по 18.05.2027.

### **References**

1. Kulikov G.G. Mathematical models used in CAD of engine and control systems// B.A.Cherkasov. Automatics and regulation of jet engines. – M: Mechanical engineering, 1988. – P. 323-343.

2. Automatics and regulation of aviation engines and power plant. Manual /A.A. Inozemtsev, M.A.Nikhamkin, V.L.Sandratsky. - M.: Mechanical engineering, 2008.-V.5.-P. 187.: - (Series: Gas turbine engines).

3. Complex of information and hardware-in-the-loop modeling for investigation of control-and-condition-monitoring systems of multy-engine power-plants during condition-based in-service use / V.S. Fatikov, G.I. Pogorelov, I.I. Minaev, M.R. Azanov, S.G. Kulikov, V.P. Ishchuk// Aerospace technic and technology.-2005. № 2. p.155-160.

4. Raspopov E.V., Kulikov G.G, Fatikov V.S, Arkov V.Yu. Intelligent start-up system for new generation of aviation gas turbine engines // USATU bulletin, 2007. - V.9, № 2 (20). P.153-157.

5. Hardware-in-the-loop faults simulation of gas turbine engines faults for testing of control-and-condition-monitoring systems of engines / V.Yu Arkov, G.G. Kulikov, S.V. Epifanov, I.I. Minaev // Aerospace technic and technology. - №7(15), 2004. – P.167–173.

6. Kulikov G., V., Lyantsev O., et al. Dynamic Modeling Of Gas Turbines / G. Kulikov, H.A. Thompson, eds. Springer-Verlag, New York, 2004, 309.

7. Kulikov G.G., Kotenko P.S., Fatikov V.S., Pogorelov G.I. Intelligent information technologies for control and diagnostics of gas turbine engines and their systems at all stages

of their life cycle//Proc. AMETMAS-NOE Int. Workshop on Problems of Technology Transfer, Ufa, 1999. P.121-124.

8. GOST R ISO/MEC 15288-2005 Information technology. Systems engineering. Processes of systems life cycle.

9. Hardware-in-the-loop method of simulation of automated control-and-condition-monitoring systems of gas turbine engines and the test-bed for its realisation. / G.G. Kulikov, G.I. Pogorelov, V.Yu. Arkov, V.S. Fatikov, M.R. Azanov, S.V. Epifanov, A.I. Abdunagimov / Patent. 2340883 Russian Federation, IPC G01M 15/14. №2007118610/06, declared. 18.05.2007; published. 10.12.2008, Bulletin. №34; Priority 18.05.2007, №2007118610 (Russian Federation). - Valid from 10.12.2008 till 18.05.2027.

## METHODOLOGY COMPLEX OF HARDWARE-IN-THE-LOOP FUNCTIONAL MODELLING OF GAS TURBINES AND ITS SYSTEMS

© 2009 G. G. Kulikov<sup>1</sup>, V. Yu. Arkov<sup>1</sup>, V. S. Fatikov<sup>1</sup>,  
A. I. Abdunagimov<sup>1</sup>, G. I. Pogorelov<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Ufa State Aviation Technical University

<sup>2</sup>Ufa Research-and-Production Enterprise "Molniya"

The problems of building of adequate structural complex gas turbine model for hardware-in-the-loop investigation of the automatic control system behavior with system faults are discussed. The structure and technology for creation of the adequate complex gas turbine model with an example of twin-shaft bypass reheat turbo jet for hardware-in-the-loop simulation, including a special complex of models of switching between operation and reconfiguration in FADEC control-and-condition-monitoring systems with system faults are offered.

*Structural complex model, automatic control, condition-monitoring and diagnosis system, gas turbine engines, system faults, hardware-in-the-loop simulation complex, switching model, reconfiguration*

### Информация об авторах

**Куликов Геннадий Григорьевич**, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой автоматизированных систем управления Уфимского государственного авиационного технического университета. Область научных интересов: автоматические системы управления силовыми установками летательных аппаратов.

**Арьков Валентин Юльевич**, доктор технических наук, профессор кафедры автоматизированных систем управления Уфимского государственного авиационного технического университета. Область научных интересов: идентификация и моделирование системы автоматического управления газотурбинными двигателями.

**Фатиков Виктор Сергеевич**, кандидат технических наук, доцент, ведущий научный сотрудник кафедры автоматизированных систем управления Уфимского государственного авиационного технического университета. Область научных интересов: управление силовыми установками летательных аппаратов.



**Абдулнагимов Ансаф Ирекович**, ассистент кафедры автоматизированных систем управления Уфимского государственного авиационного технического университета. Область научных интересов: полунатурное моделирование систем автоматического управления.

**Погорелов Григорий Иванович**, кандидат технических наук, заместитель генерального директора Уфимского научно-производственного предприятия «Молния». область научных интересов – исследования в области автоматизации и управления технологическими процессами и производствами.

**Kulikov Gennady Grigorevich**, Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of Department of Automated control and management systems of Ufa State Aviation Technical University. Area of Research: management information systems, automatic control of aircraft power-plants.

**Arkov Valentine Yulevich**, Doctor of Technical Sciences, Senior research worker, Professor of Department of Automated control and management systems of Ufa State Aviation Technical University. Area of Research: identification and modeling of automatic control systems of gas turbine engines.

**Fatikov Victor Sergeevich**, Candidate of Technical Sciences, Docent, Leading research worker of Department of Automated control and management systems of Ufa State Aviation Technical University. Area of Research: aircraft power-plants.

**Abdulnagimov Ansaf Irekovich**, Assistant of Department of Automated control and management systems of Ufa State Aviation Technical University. Area of Research: hardware-in-the-loop simulation of gas turbine engines.

**Pogorelov Grigory Ivanovich**, Candidate of Technical Sciences, Deputy director general of Ufa Research-and-Production Enterprise "Molniya". Area of Research: automation and control of technological processes and manufacturing.