

АВТОМАТИЗАЦИЯ И УПРАВЛЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ ПРОЦЕССАМИ И ПРОИЗВОДСТВАМИ

УДК 629.7.035

Г. Г. КУЛИКОВ, В. Ю. АРЬКОВ, В. С. ФАТИКОВ, Г. И. ПОГОРЕЛОВ

**МЕТОДОЛОГИЯ ПОЛУНАТУРНОГО КОМПЛЕКСНОГО
ФУНКЦИОНАЛЬНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ГТД И ЕГО СИСТЕМ**

Обсуждаются проблемы построения адекватной структурной комплексной модели ГТД с целью полунатурного исследования поведения САУ при системных отказах. Предложены структура и технология построения адекватной комплексной модели ГТД на примере ТРДДФ для полунатурного моделирования, включающие специальный комплекс моделей переключения режимов функционирования и реконфигурации системы управления, контроля и диагностики FADEC при системных отказах. *Структурная комплексная модель; система автоматического управления; контроля и диагностики; ГТД; системные отказы; полунатурный моделирующий комплекс; модель переключения; реконфигурация*

Обсуждается проблема полунатурного функционального комплексного моделирования авиационной газотурбинной силовой установки (в том числе и многодвигательной) при «нештатной» работе отдельных ее систем и подсистем. Одновременная работа систем управления, контроля и диагностики может приводить к «коллизиям», которые необходимо учитывать при проектировании и доводке системы «ГТД + FADEC» [5]. Поэтому актуальной является проблема методологии и соответствующей технологии комплексного полунатурного исследования ГТД и его систем.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

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

- 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 – натуральный 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 ее 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 ее «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) топливные;
- 3) диагностики;
- 4) пусковые;
- 5) воздушные;
- 6) смазки и суфлирования;
- 7) гидравлические;
- 8) дренажные.

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 гидропневмомеханической исполнительной 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 газозвоздушного 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 в таблице.

ТЕХНОЛОГИЯ ПОСТРОЕНИЯ АДЕКВАТНОЙ СТРУКТУРНОЙ МОДЕЛИ ГТД И ЕГО СИСТЕМ

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

- уровень 1: схемы агрегатирования, спецификации (в графических средах 3D, 2D, 1D-представления);

- уровень 2: модели взаимодействия подсистем (в графических средах 2D, 1D-представления);

- уровень 3: 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 и управления к процессному. Это накладывает соответствующие требования к определению структур процессов моделирования, проектирования, испытания и других производственных процессов. Построение таких процессных моделей моделирования и исследования функционирования систем контроля и диагностики для ГТД требует новых методологических разработок. В таких системах должны соблюдаться иерархия организации системы, состоящей из подсистем. Это позволит создавать метамоделли с сетевой структурой, где будут объединены различные структуры.

Для этого предполагается разработать 2 класса моделей:

- 1) модели отдельных подсистем (3D, 2D, 1D-представлений);

- 2) модели объединенных 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 объективно существуют процессы контроля и диагностики отдельных подсистем ГТД, в которых реализуются процессы «сверху вниз», то есть от анализа дефекта, зафиксированного на верхнем уровне, до обнаружения и локализации в конкретном конструктивно сменном блоке (КСБ) и обнаружении отказов и локализации КСБ (локальной системой встроенного контроля) и анализа их воздействий на уровень системы [7]. Отметим, что эти процессы обеспечиваются функциональной организацией системы и в явной форме не контролируются.

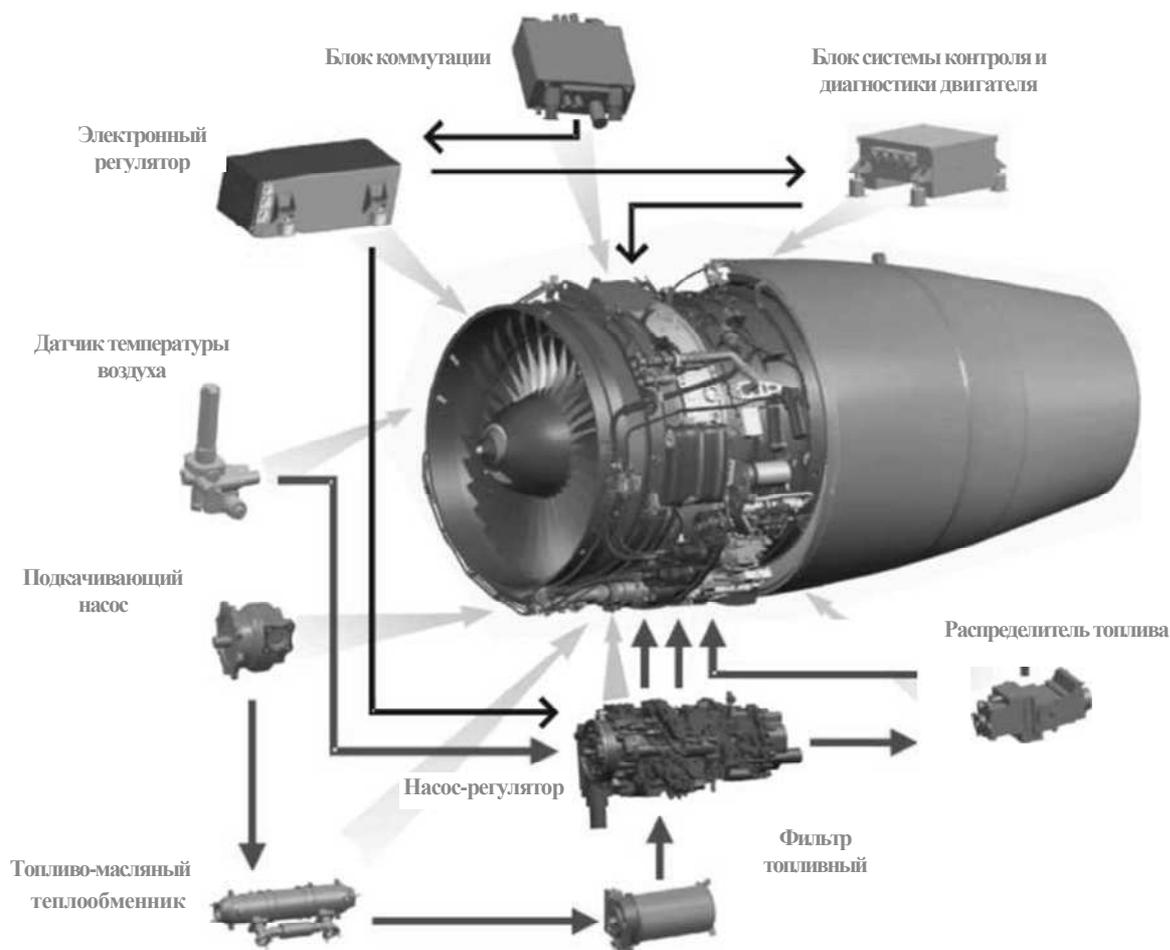


Рис. 1. Состав агрегатов системы автоматического управления, контроля и топливопитания ТРДД (из [2])

Высокая степень информатизации и компьютеризации систем контроля и диагностики позволяют часть задач, которые решались наземными станциями обслуживания, перенести на уровень борта самолета [7]. В этом случае требуется построение двух классов процессов:

- процессы создания систем управления и диагностики двигателя и его систем;
- процессы реализации контроля и диагностики в бортовых информационных и диагностических комплексах с оптимальным распределением между наземными и бортовыми системами.

4. Рассмотренный подход позволяет строить модели процессов, отвечающих условиям «прослеживаемости» (определение причин и следствий состояний отдельных систем и подсистем) и соответствия требованиям стандартов ИСО 9000, что позволяет решать обратную задачу при контроле и диагностике: имея факт отказа проследить влияние его на системы и подсистемы.

ПРИМЕР РЕАЛИЗАЦИИ КОМПЛЕКСНОЙ МОДЕЛИ ГТД (ТРДДФ) И ЕГО СИСТЕМ КАК ОБЪЕКТОВ УПРАВЛЕНИЯ, КОНТРОЛЯ И ДИАГНОСТИКИ НА ПМК

Комплекс моделей ГТД как объекта управления:

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

$$\begin{aligned}\bar{X} &= f(\bar{X}, \bar{V}, \bar{U}); \\ Y &= \varphi(X, V, U);\end{aligned}$$

где $\bar{X} = [n_i \dots]^T$ – вектор переменных состояний; $\bar{V} = [M, H, N_{ny}, N_{отб}]^T$ – вектор внешних воздействий; $\bar{U} = [G_T, \alpha_{на}, G_{отб}, F_{pc}, \dots]^T$ – вектор управления; f, φ – нелинейные операторы; \bar{Y} – вектор выходных координат.

1) кусочно-линейная всережимная модель ГТД – получают из базовой модели по известной методике [1, 4, 6];

2) специальные кусочно-линейные модели ГТД:

- запуска двигателя, в том числе модель процесса зажигания;
- запуска форсажной камеры, в том числе модель процесса воспламенения;

3) кусочно-линейные 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.

4) модели систем:

● ММ топливной системы основного и форсажного контуров: насосы и дозаторы, приводы механизации турбокомпрессора, реактивного сопла, коллекторы форсунок, топливные фильтры и др.;

● пусковая система: стартер, система подачи топлива в камеру сгорания, система зажигания, система механизации турбокомпрессора, система электропитания агрегатов;

- системы смазки и суфлирования;
- воздушной системы;
- гидравлической системы реактивного сопла;
- дренажной системы.

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 формирования условий и значений параметров, обеспечивающих включение и выключение проверяемых алгоритмов контроля и диагностики с целью 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:

● отработку алгоритмов контроля и диагностики силовой установки совместно с моделями имитации отказов двигателя и его систем – элементов ГТД, механизации турбокомпрессора, топливных, масляных и других 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. и, кроме того, информационные модели других ГТД и взаимодействующих с FADEC самолетных систем [3].

Таблица

Состав комплексной модели ГТД и его систем для реализации в ПМК

ГТД и его системы	Модели нормального функционирования	Модели формирования отказных ситуаций	Модели переключения (реконфигурации системы ГТД + FADEC)
ГТД	Базовая или кусочно-линейная	ММ формирования отказов ГТД (перечисление отказов см. выше)	Модели: <ul style="list-style-type: none"> восстановления режима работы двигателя; перехода на безопасный режим; выключения двигателя
FADEC-натурный блок	Алгоритмы функционирования FADEC при отсутствии отказов ГТД и его систем	<ul style="list-style-type: none"> физическое моделирование обрывов и коротких замыканий сигнальных линий датчиков и исполнительных механизмов; ММ формирования отказов ГТД и его систем для каналов контроля FADEC 	<ul style="list-style-type: none"> 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)	<ul style="list-style-type: none"> 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 	<ul style="list-style-type: none"> исполнительных частей дублирующего, резервного канала управления, резервной системы управления; выключения форсажной камеры; переходов на безфорсажный режим (штатного и аварийного)
Система запуска	<ul style="list-style-type: none"> 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	<ol style="list-style-type: none"> ММ формирования отказов системы по контролируемым параметрам: <ul style="list-style-type: none"> количеству масла в баке; температуре и давлению на входе в двигатель, в полостях опор двигателя. 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

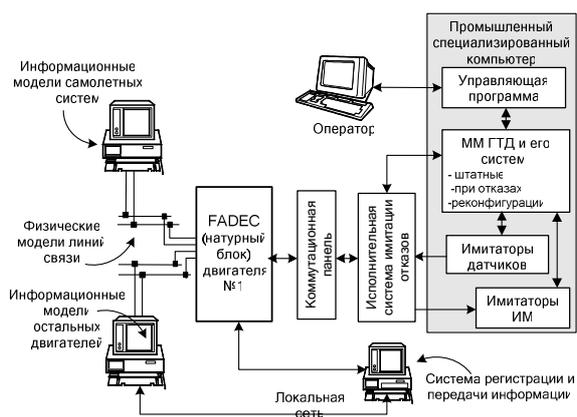


Рис. 2. Структурная схема ПК, реализующего комплексную модель ГТД и его систем в составе многодвигательной силовой установки самолета

ПОЛУНАТУРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ОТКАЗОВ ГТД И ЕГО СИСТЕМ

Задачей системы полунатурного моделирования отказов ГТД и его систем в составе КПМ является моделирование как одиночных, так и «следственных» отказов, то есть автоматического включения отказов двигателя, его систем, датчиков и исполнительных механизмов в заданной последовательности. 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 следующем 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 коэффициентов динамических моделей. Для внезапных отказов – это скачкообразное изменение коэффициента A на величины ΔA , B на ΔB . Величина этих скачков определяется заранее по модели двигателя и его систем для каждого отказа. Например, в случае обрыва лопатки компрессора снижается КПД компрессора, что выражается в соответствующем изменении коэффициентов ΔA и ΔB в динамической модели. Другие отказы двигателя, например, прогорание камеры сгорания или разрушение лопатки турбины приводит к другим изменениям коэффициентов ΔA и ΔB . Аналогичным определяются отказы и в моделях систем двигателя.

Исполнительная система имитации отказов (рис. 2) физически имитирует: обрыв; замыка-

ние входной электрической цепи имитатора исполнительного механизма; фиксации положения исполнительного механизма; имитации движения исполнительного механизма с постоянной скоростью до положения ограничения. Также в исполнительной системе физически имитируются; обрыв; короткое замыкание выходной электрической цепи имитатора датчика. Логику переключения ключей для имитации отказов датчиков, исполнительных механизмов и двигателя задает оператор с помощью $k(n + 6)$ признаков в программно управляемом наборном поле [9].

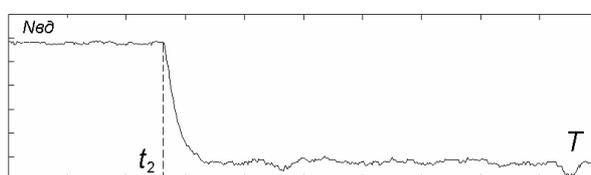
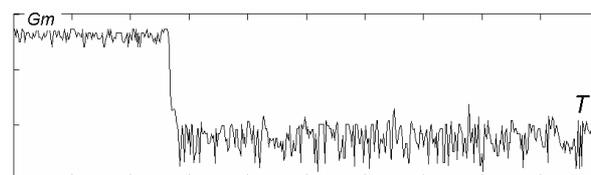
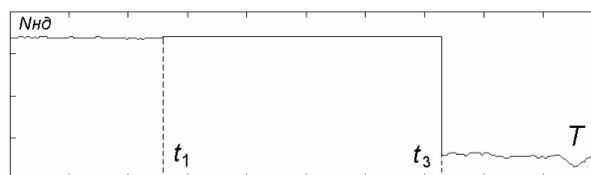


Рис. 3. Измеренные значения параметров

При работе контура регулирования частоты вращения ротора низкого давления $n_{нд}$ был имитирован обрыв цепи датчика $n_{нд}$ в момент времени t_1 . Встроенная система контроля регулятора обнаружила обрыв и выдала дискретный сигнал «обрыв датчика» SF (рис. 4). Далее был сформирован сигнал «отказ измерительного канала» MF. В процессе парирования отказа произошла реконфигурация FADEC с переходом на регулирование степени повышения давления.

В момент времени t_3 была восстановлена электрическая цепь отказавшего датчика. Восстановление датчика было обнаружено встроенной системой контроля (BCK), но структура FADEC не изменилась (в соответствии с логикой данной FADEC).

В процессе парирования отказа значение частоты вращения с отказавшего датчика было «зафиксировано» 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].

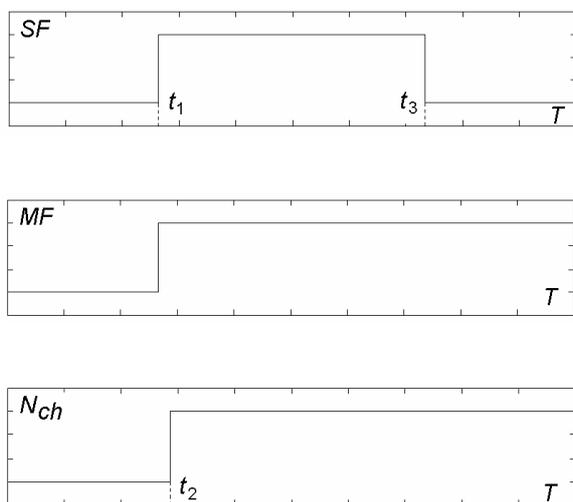


Рис. 4. Дискретные сигналы при реконфигурации

В процессе реконфигурации наблюдается переходной процесс по расходу топлива Gm и частоте вращения ротора высокого давления $n_{вд}$ на рис. 3. Причина – расхождение в настройках «задатчиков» разных каналов регулирования, выявление которой представляет собой дополнительный результат совместной отработки алгоритмов управления и контроля FADEC на ПМК.

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

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.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

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

2. Иноземцев А. А., Нихамкин М. А., Сандрацкий В. Л. Автоматика и регулирование авиационных двигателей и энергетических установок: Учеб. М.: Машиностроение, 2008. Т. 5. 187 с.

3. Комплекс информационного и полунатурного моделирования для исследования систем автоматического управления и контроля многодвигательных силовых установок при их эксплуатации по состоянию / В.С. Фатиков [и др.] // Авиационно-космическая техника и технология. 2005. № 2. С. 155–160.

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

5. Полунатурное моделирование отказов ГТД для испытаний систем контроля и диагностики двигателей / В. Ю. Арьков [и др.] // Авиационно-космическая техника и технология. 2004. № 7(15). С. 167–173.

6. Dynamic Modeling Of Gas Turbines / G. Kulikov [et al]. Springer-Verlag, New York, 2004, 309 p.

7. Intelligent information technologies for control and diagnostics of gas turbine engines and their systems at all stages of their life cycle / G. Kulikov [et al] // 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. Способ полунатурных испытаний систем автоматического управления и контроля газотурбинных двигателей и стенд для его реализации / Г. Г. Куликов [и др.]. 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.

ОБ АВТОРАХ

Куликов Геннадий Григорьевич, проф., зав. каф. АСУ. Дипл. инж. по автоматиз. машиностроения (УАИ, 1971). Д-р техн. наук по систем. анализу, автоматич. упр. и тепловым двигателям (УАИ, 1989). Иссл. в обл. АСУ и упр. силовыми установками ЛА.



Фатиков Виктор Сергеевич, вед. науч. сотр. каф. АСУ. Дипл. инж.-мех. по судовым машинам и механизмам (ЛИВТ), двигателям ЛА (УАИ, 1971). Канд. техн. наук по двигателям ЛА (УАИ, 1983). Иссл. в обл. автоматич. управления силовыми установками ЛА.



Арьков Валентин Юльевич, проф. каф. АСУ. Дипл. инж. по пром. электронике (УАИ, 1986). Д-р техн. наук по сист. анализу и упр-ю (УГАТУ, 2001). Иссл. в обл. идентификации и моделирования САУ ГТД.



Погорелов Григорий Иванович, зам. ген. дир. ФГУП УНПП «Молния». Дипл. инженер по электр. машинам и аппаратам (УАИ, 1977). Канд. техн. наук по автоматиз. технологическ. процессов и производств (УГАТУ, 2002). Иссл. в обл. автоматич. и автоматизир. систем измерений и управления.