

УДК 621.452.3

**И. А. КРИВОШЕЕВ, Д. А. АХМЕДЗЯНОВ, А. Е. КИШАЛОВ****ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ  
РАБОТЫ АВИАЦИОННЫХ ГТД  
С ЭЛЕМЕНТАМИ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ**

Описана разработанная система имитационного моделирования DVIGwp, позволяющая моделировать, исследовать и прогнозировать различные режимы работы ГТД произвольных схем совместно с элементами их систем управления. Проведена проверка соответствия расчета и эксперимента одного из переходных процессов в современном двигателе. *авиационные двигатели; имитационное моделирование; системы управления; переходные процессы*

**ВВЕДЕНИЕ**

Совершенствование авиационных газотурбинных двигателей (ГТД) и энергетических установок на их базе идет по пути дальнейшего улучшения удельных показателей при одновременном ужесточении требований по надежности и ресурсу. Отличительными чертами перспективных силовых установок являются: разнообразие режимов и условий эксплуатации, близость рабочих режимов к ограничениям по прочностным, температурным и функциональным параметрам, большое число регулирующих органов. В настоящее время, в связи с созданием авиационных двигателей новых поколений, а также с повышением требований к эффективности процессов их проектирования и доводки, все больше внимания уделяется методам и средствам математического моделирования ГТД, их узлов, элементов систем управления и контроля двигателя. Использование информационных технологий в существенной мере определяет успешность создания авиационных двигателей новых поколений.

Современный газотурбинный двигатель представляет собой сложную динамическую систему с взаимосвязанным влиянием механических, газодинамических, теплофизических и физико-химических процессов, протекающих в его узлах, элементах проточной части (ПЧ), элементах систем двигателя. Функционирование двигателя происходит под воздействием внутренних и внешних возмущений, а для маневренных самолетов — с преобладанием неустановившихся режимов [1].

Усложнение задач управления, использование более совершенных и сложных алгоритмов управления, развитие электронных технологий создали предпосылки широкого внедрения методов математического моделирования для задач оптимального управления двигателем.

Опыт создания современных двигателей выявил большую роль переходных процессов в обеспечении таких важных показателей, как газодинамическая устойчивость, управляемость, диапазон и темпы изменения тяги, величина и длительность возможного превышения допустимых уровней температуры, давления газа и частоты вращения роторов. Динамические характеристики двигателей являются одними из наиболее важных факторов, которые необходимо учитывать уже на стадии проектирования при определении рабочих режимов, при распределении работ по каскадам компрессора многовальных ГТД, при выборе законов управления и методов контроля [2].

**СИСТЕМА ИМИТАЦИОННОГО  
МОДЕЛИРОВАНИЯ РАБОТЫ  
АВИАЦИОННЫХ ГТД**

Авторами разработана система имитационного моделирования (СИМ DVIGwp) работы авиационных ГТД (и ГТЭУ на их базе) на установившихся и неустановившихся режимах в термогазодинамическом аспекте [3, 6, 7], разработаны математические модели узлов двигателя, элементов управления (автоматики) и контроля, реализованные в

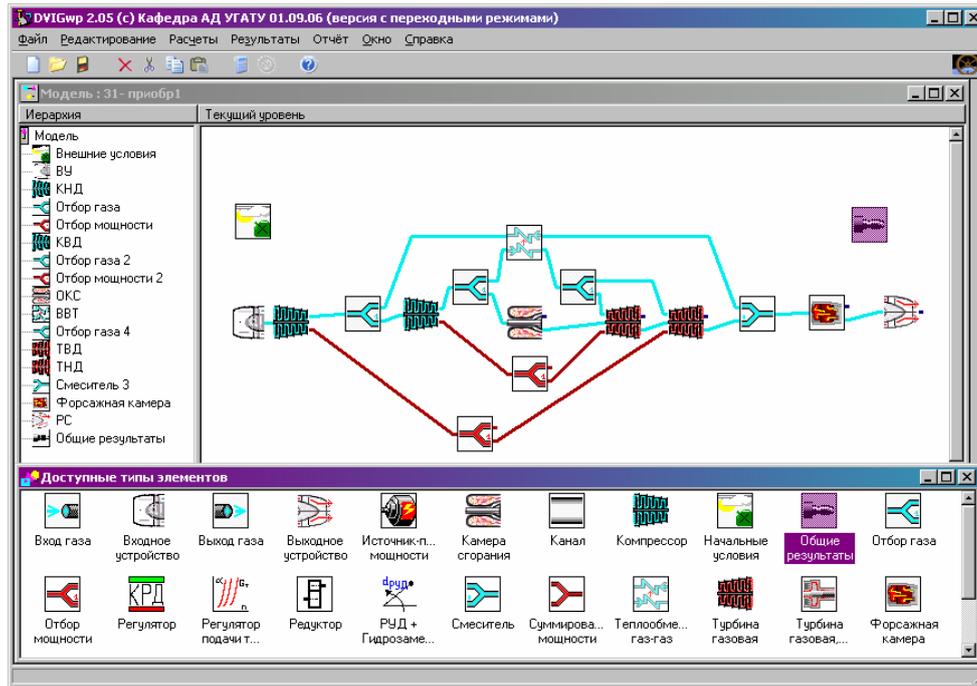


Рис. 1. Модульность построения и задание информационных потоков

СИМ DVIGwr и позволяющие моделировать, исследовать и прогнозировать различные режимы работы ГТД произвольных схем совместно с элементами их систем управления, при этом решать различные проектно-доводочные задачи [5].

Суть разработанного метода моделирования различных установившихся и неустановившихся режимов работы ГТД произвольных схем базируется на совокупности следующих принципов:

1) модульность построения модели расчетной схемы: представление моделируемого двигателя (установки) с системой автоматического управления и элементами контроля из связанных между собой информационными потоками модулей (рис. 1) — моделей структурных элементов (СЭ) двигателя (входное устройство, компрессор, камера сгорания, турбина, реактивное сопло, отбор воздуха, потребитель мощности и т. д.), а также элементов САУ (регуляторы, исполнительные механизмы, датчики и т. д.) — такой подход позволяет осуществлять моделирование ГТД произвольных схем и описывать их автоматизацию;

2) единая схема представления модулей (моделей СЭ): задание входных данных и характеристик, алгоритма расчета и получение выходных данных (рис. 2); при этом предложен оригинальный метод сетевого представления взаимосвязи параметров в виде ориентированного графа, где ребра являются пара-

метрами и функциями влияния, вершины — рекуррентными операторами, из которых состоит алгоритм СЭ;



Рис. 2. Единая схема представления модулей (СЭ)

3) выполнение законов сохранения (вещества, энергии, количества движения и т. д.) за счет задания в моделях СЭ специальных «портов» и унифицированных типов информационных потоков (газодинамического, механического и пр.), благодаря чему формируемые из моделей СЭ модели ГТД и их САУ тоже изображаются ориентированными графами;

4) независимость и возможность вариации учета в модели различных факторов: принцип позволяет вносить изменения и дополнения, связанные с необходимостью учета или уточнения новых факторов, изменять алгоритмы расчета модулей двигателя или элементов управления в зависимости от схемы двигателя, от условий и режимов работы,

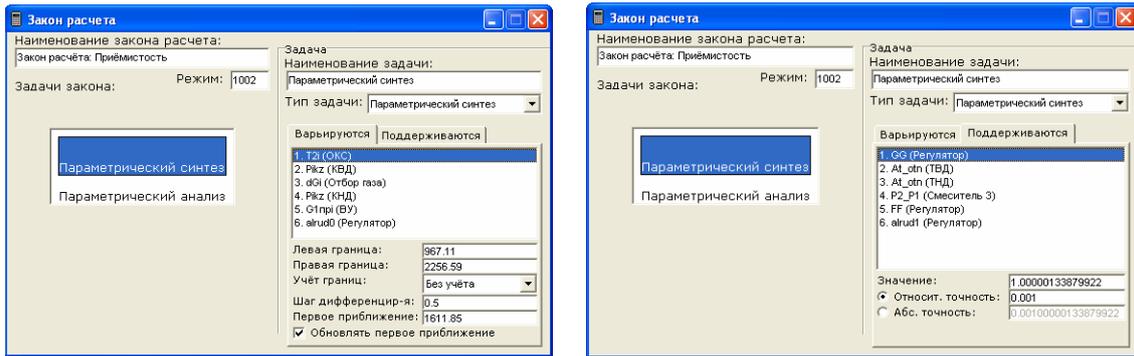


Рис. 3. Задание условий анализа в СИМ DVIWgp

от требований, предъявляемых к динамике двигателя на различных режимах, от особенностей рабочих процессов конкретных ГТД, при этом динамические свойства (функции) модели добавляются к статическим моделям независимо как дополнительные ребра и вершины в ориентированном графе и, соответственно, как дополнительные рекуррентные операторы, не изменяя ранее отлаженную и оттестированную часть алгоритма СЭ;

5) решение произвольных проектно-доводочных задач путем задания условий моделирования: для любой задачи в «законе расчета» среди параметров СЭ указываются функции цели — так называемые «поддерживаемые» параметры или комплексы (в т. ч. параметры и законы регулирования, законы изменения внешних воздействий и других условий) и варьируемые величины (константы или характеристики узлов двигателя, регуляторов, исполнительных механизмов САУ, датчиков и т. д.), за счет вариации и табуляции которых достигается выполнение функции цели (рис. 3). Выполнение законов расчета ре-

ализуется с помощью решателя (процессора СИМ) с использованием методов многокритериальной оптимизации — останов происходит, когда каждый «поддерживаемый» параметр оказывается в заданной области, с заданной для него точностью [8].

Разработанные принципы легли в основу созданной системы имитационного моделирования (СИМ) DVIWgp, структура которой показана на рис. 4.

Разработанный универсальный метод моделирования различных установившихся и неустановившихся режимов работы двигателей и их систем управления включает:

1) библиотеку моделей структурных элементов (СЭ) ГТД (входное устройство, компрессор, камера сгорания, турбина, сопло, выхлопной патрубок, смеситель, разделитель, переходный канал, пусковое устройство, форсажная камера сгорания и т. д.) и элементов систем управления (регуляторы, датчики и т. д.);

2) препроцессор — обеспечивает синтез модели (структурный и параметрический),



Рис. 4. Структура СИМ DVIWgp

указание термогазодинамических, механических, гидравлических и других связей (трассировка потоков), задание и редактирование параметров и характеристик СЭ, задание условий, реализующих заданную проектно-доводочную задачу (формализованное построение «закона расчета») в виде условий для задачи многовариантного, многорежимного анализа и (или) синтеза с табуляцией параметров — для решателя (процессора) СИМ;

3) процессор (решатель СИМ) — обеспечивает последовательную активизацию моделей СЭ в соответствии с матрицей инцидентности ориентированного графа (с учетом трассировки потоков — связей СЭ), управление (по аналогии с регулятором в САУ) движением имитационной моделью от начальных условий к решению в соответствии с законом расчета (за счет вариации указанных варьируемых параметров и приведения «поддерживаемых» параметров в заданные области с заданной точностью). В процессоре имеется библиотека численных методов оптимизации (обычно используется метод Ньютона, а для интегрирования — метод Эйлера или Рунге-Кутты). Для учета накладываемых границ используется метод штрафных функций;

4) постпроцессор — обеспечивает отображение и документирование результатов, в т. ч. в форматах обмена с другими приложениями;

5) архив — обеспечивает хранение библиотек моделей ГТД и характеристик СЭ;

6) редактор характеристик СЭ — обеспечивает задание, редактирование, доступ к характеристикам СЭ (элементов ГТД, их САУ) в табличном, графическом виде, задание в виде файлов и аналитических зависимостей.

СИМ DVIGwr является открытой системой и базируется на Framework CAMCTO (рис. 5) [2, 4], предназначенной для создания автономных приложений, ориентированных на моделирование различных технических объектов и систем, что дает возможность пользователю вносить добавления, изменения для решения конкретных задач, создавать новые СЭ и информационные потоки.

Синтез модели осуществляется в соответствии со схемой двигателя. Математическая модель ГТД, предложенная в работе, включает в себя описание:

- характеристик регуляторов и элементов контроля (а не только узлов и других элементов ГТД);
- связи между элементами двигателя, САУ и элементов контроля (механическую, гидравлическую, логическую и т. д. — с уче-

том аспекта и особенностей системы моделирования);

- законов изменения управляющих воздействий (подачи топлива, управления органами механизации двигателя), внешних условий, накладываемых дополнительных условий — с учетом проектно-доводочной ситуации;

- значимых динамических факторов, номенклатура которых определяется особенностью рассматриваемого переходного процесса, особенностью решаемой проектно-доводочной или эксплуатационной задачи, особенностью схемы и параметрами двигателя.

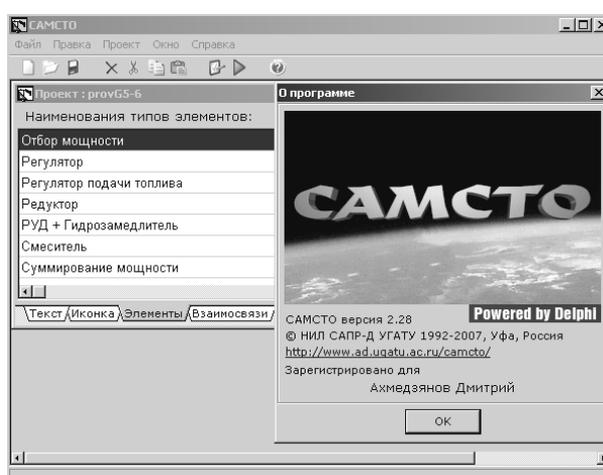


Рис. 5. Внешний вид Framework CAMCTO

#### ИНФОРМАЦИОННАЯ ТЕХНОЛОГИЯ ОТЛАДКИ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ВКЛЮЧЕНИЕМ ФОРСАЖА ДВИГАТЕЛЯ ПРИ ПРИЕМО-СДАТОЧНЫХ ИСПЫТАНИЯХ

Также авторами разработана методика информационной технологии отладки системы управления включением форсажа двигателя с использованием СИМ DVIGwr (рис. 6) и получены результаты ее применения на практике при приемно-сдаточных испытаниях в серийном производстве. Под отладкой параметров ГТД понимается обеспечение в процессе испытаний требуемых значений его основных параметров путем целенаправленного воздействия на специально предусмотренные для этого регулировочные элементы САУ двигателя.

В системе топливной автоматики форсажного контура предусматриваются следующие функции: управление соплом; дозирование форсажного топлива в зависимости от  $\alpha_{руд}$ ,  $p_2$ ,  $t_6$  ( $t_6$  — температура в боксе) и распределение его по коллекторам; поддержание на максимальном и форсажных режимах посто-

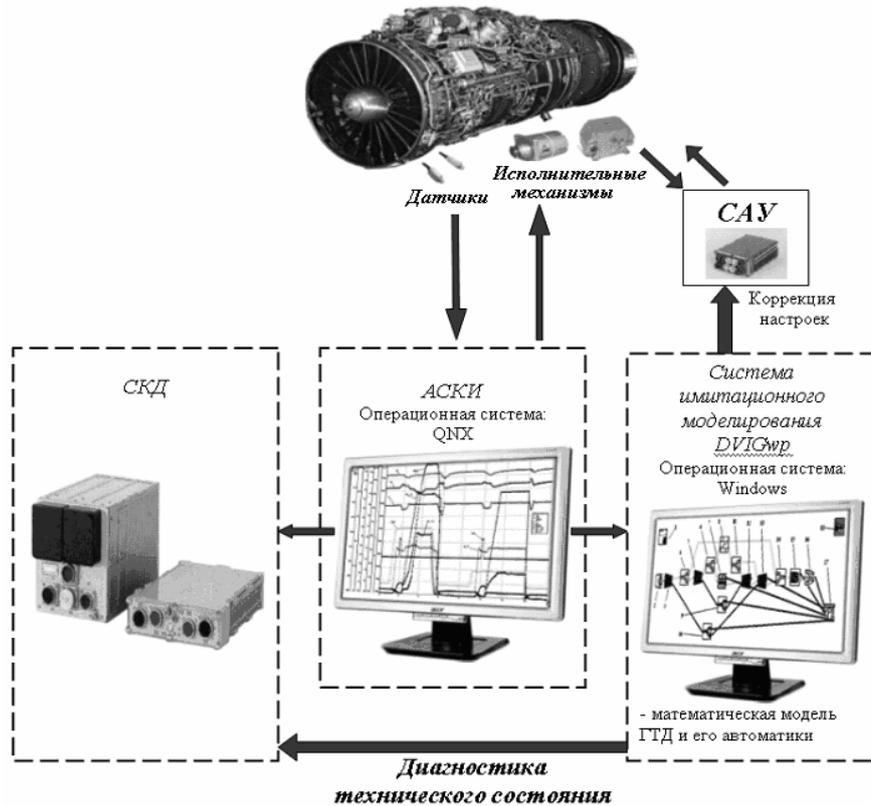


Рис. 6. Схема взаимодействия различных систем при отладке

янного перепада давления в турбине  $\pi_T$  (за счет изменения площади критического сечения сопла); увеличение  $\pi_T$  в момент воспламенения топлива ФКС и в процессе выхода на полный форсажный режим во избежание превышения температуры за турбиной и уменьшения газодинамической устойчивости двигателя; обеспечение аварийного выключения форсажа и др.

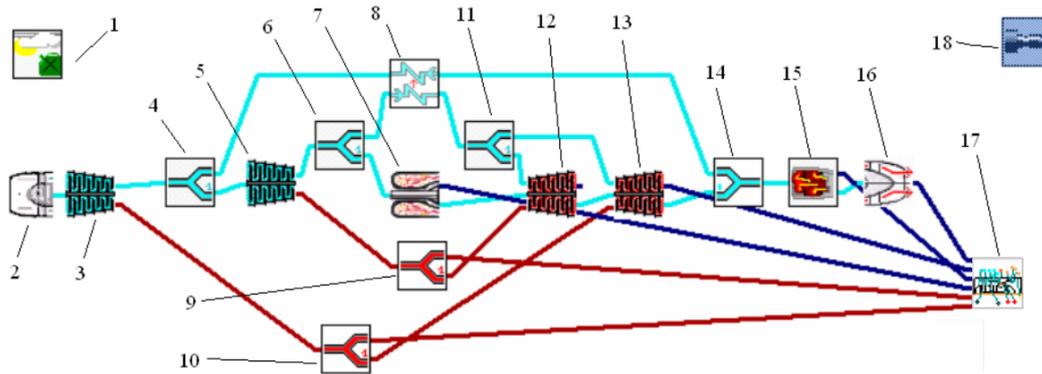
Типичный состав топливной системы ФКС: форсажный насос, регулятор сопла и форсажа (РСФ), агрегат перестройки  $\pi_T$ , распределитель форсажного топлива, воздушный фильтр-редуктор, топливные коллекторы, насос-регулятор (НР), трубопроводы и электрожгуты, комплексный регулятор двигателя (КРД).

Разработанная методика позволяет проводить предварительную отладку конкретного двигателя, сочетая его испытания на стенде с имитационным моделированием [5]. При этом по результатам испытаний идентифицируется модель ТРДДФ с его САУ, с использованием этой модели определяется необходимое изменение настроек автоматики, результаты проверяются имитационным моделированием на компьютере, затем изменение настроек выполняется на двигателе. После этого двигатель вновь может не испытываться. Од-

нако на данном этапе, в процессе отладки методики, необходимо проводить проверочные испытания для подтверждения того, что все параметры оказываются в пределах допуска.

В сформированной в СИМ имитационной модели двухвального ТРДДФ (рис. 7) присутствует СЭ «Регулятор», являющийся интегральной моделью автоматики форсажного контура.

Шесть входных «портов» для подключения входных информационных потоков связывают регулятор с элементами модели ГТД, характеристики которых необходимо регулировать. При этом по четырем входным портам передаются значения температуры, давления, расхода топлива, площади критического сечения сопла; еще два предусмотрены для механических потоков типа «МЕХ», передающих частоты вращения роторов, их ускорение и мощность. Входными (управляющими) данными для СЭ «Регулятор» являются: параметры, характеризующие положение регулировочных винтов и жиклеров (имитация реальных возможностей воздействия на автоматику двигателя), положение переключателей, угол установки РУД (имитация воздействия летчика/оператора испытательного стенда). Для настройки имитационной модели на решение конкретной проектной или



**Рис. 7.** Модель ТРДД с элементами автоматики в системе DVIGwp, где 1 — внешние условия; 2 — входное устройство; 3 — КНД; 4 — отбор газа; 5 — КВД; 6 — отбор газа 2; 7 — камера сгорания; 8 — воздухо-воздушный теплообменник; 9 — отбор мощности; 10 — отбор мощности 2; 11 — отбор газа 2; 12 — ТВД; 13 — ТНД; 14 — смеситель; 15 — ФКС; 16 — РС; 17 — регулятор; 18 — общие результаты

доводочной задачи задается закон (условия) расчета.

СЭ «Регулятор» в зависимости от значения  $\alpha_{руд}$  генерирует управляющие воздействия на двигатель ( $G_T$ ,  $G_{Т.ф}$ ,  $F_{с.кр}$ ). Изменяя внутренний алгоритм СЭ «Регулятор», можно реализовывать самые разные программы управления и учитывать всевозможные ограничения.

С помощью разработанной методики (рис. 8) определяются настройки регулирующих элементов автоматики двигателя и рекомендации по отладке. Для этого данные отлаживаемого двигателя, полученные во время предшествующих испытаний, передаются в математическую модель, настроенную на двигатель со среднестатистическими параметрами. Система автоматически производит идентификацию — приводит математическую модель в соответствие с реальным объектом на режиме М (получаем индивидуальную математическую модель отлаживаемого двигателя с конкретными параметрами за каждым узлом). Автоматику форсажного контура необходимо идентифицировать по результатам нескольких переходных процессов (например, включения форсажа и выхода на режим ПФ). После идентификации проводим моделирование различных переходных режимов (М–МФ, М–ПФ, малый газ (МГ)–ПФ). В результате получаем переходные процессы, исходя из которых можно дать конкретные рекомендации по необходимым настройкам автоматики ТРДД. Произведя настройку автоматики математической модели (по данным рекомендациям), повторяем расчет в системе. После этого настраиваем автоматику отлаживаемого двигателя и проводим повторные испытания двигателя на стенде.

Адекватность математической модели и информативность рекомендаций можно повысить, увеличив число измеряемых параметров (например, включив в число измеряемых параметров температуру за компрессором низкого давления, степень понижения давления на каждой турбине, температуру за турбиной высокого давления и т. п.) или зная характеристики всех узлов в широком диапазоне (входного устройства, компрессоров, камеры сгорания, турбин, ФКС и сопла).

Также возможен второй способ отладки двигателя при помощи разработанной модели — сравнение протекания переходных процессов в моделях среднестатистического и отлаживаемого двигателя. Программа определяет, какие настройки автоматики надо произвести, чтобы из отлаженного по среднестатистическому полю допуска двигателя получить отлаживаемый. После регулировки — нужно повторить испытания ГТД, убедиться, что двигатель отлажен.

На рис. 9 приведены результаты расчета переходного процесса ТРДД. Переходный процесс: М–ПФ — 3 с, ПФ — 1 с, ПФ–М — 1 с, М — 2 с, М–МФ — 2,5 с. При этом огневая дорожка срабатывала на каждое включение форсажа один раз, условия горения соблюдались.

На рис. 10 приведены результаты расчета аналогичного переходного процесса, но с измененной регулировкой автоматики — был заменен жиклер воздушной перестройки  $\pi_T$  (изменение проливки с 60 до 110 см<sup>3</sup>/мин агрегата РСФ — изменение величины предварительного раскрытия сопла), что привело к сужению зон (границ) воспламенения и устойчивого горения, большим скоростям потока в форсажной камере и, как следствие, к срыву пламени — нерозжигу ФКС.

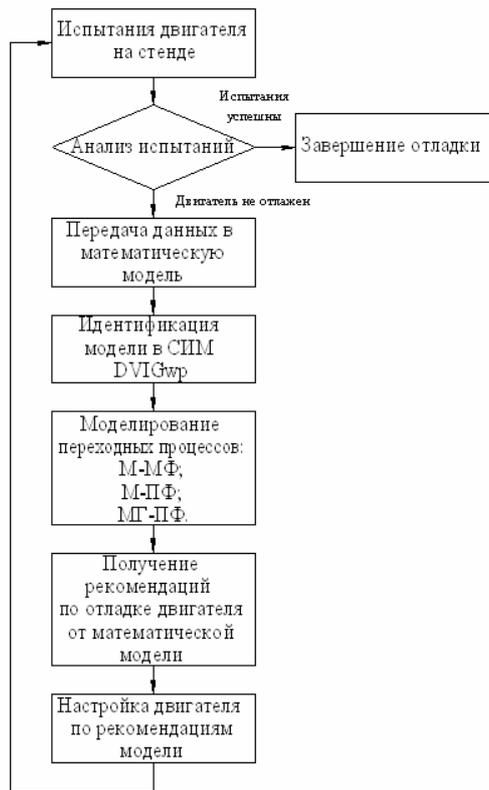


Рис. 8. Методика «информационной технологии отладки» системы управления включения форсажа в ТРДДФ

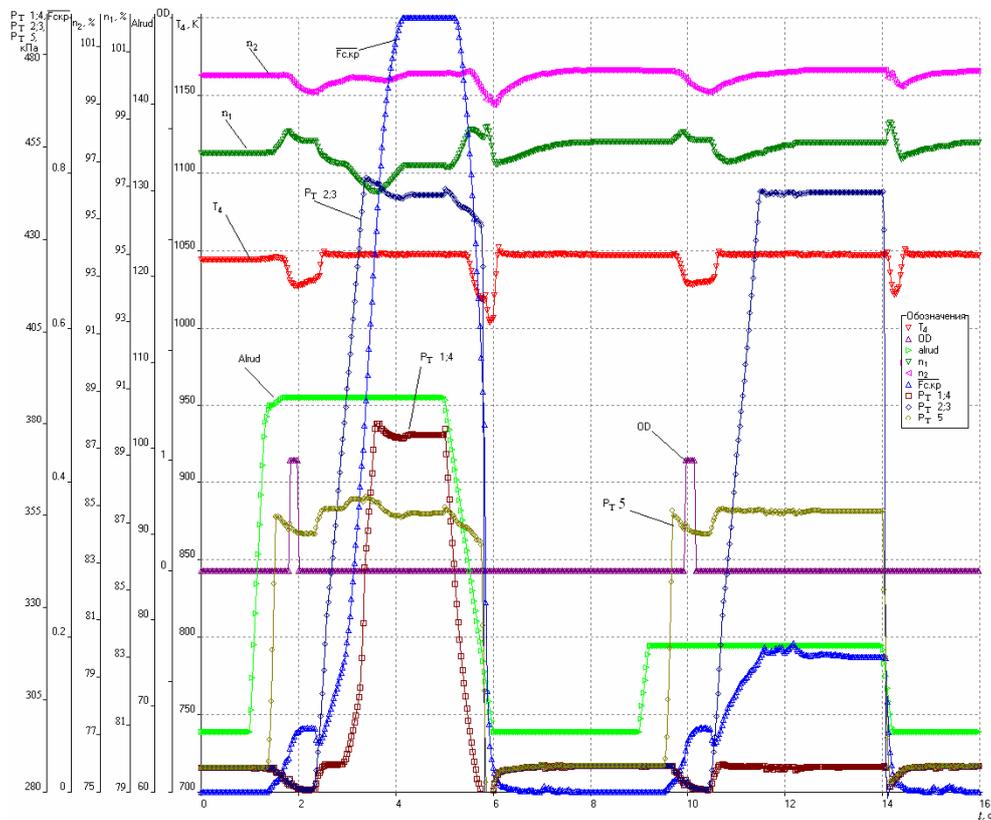


Рис. 9. Результаты расчета переходного процесса ТРДДФ: OD — наличие сигнала «огневая дорожка»,  $\overline{F_{с.кр}}$  — относительная площадь критического сечения сопла

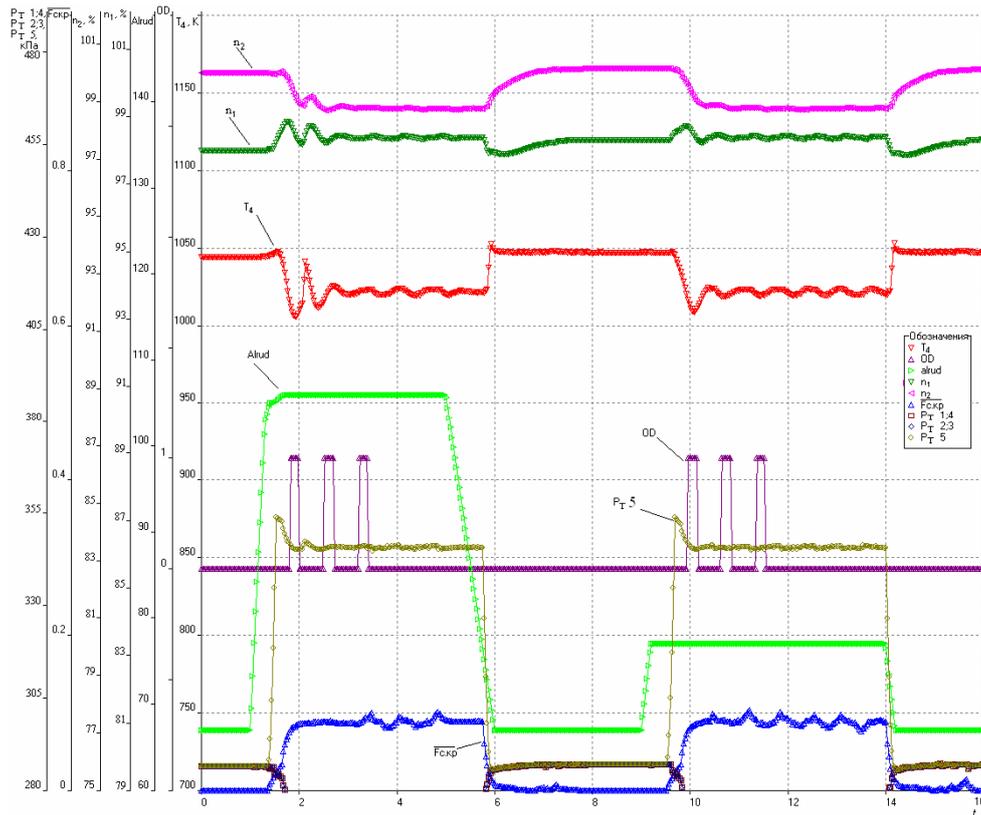


Рис. 10. Результаты расчета переходного процесса ТРДДФ с увеличенной проливкой агрегата РСФ

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, разработанная СИМ DVIGwp позволяет решать широкий круг проектно-доводочных задач:

- термогазодинамические расчеты, идентификацию моделей, расчеты характеристик;
- исследование свойств ГТД и их САУ на установившихся и неустойчивых режимах при различных внешних и внутренних воздействиях, в т. ч. нештатных ситуациях;
- научно-методическое сопровождение натурных испытаний и отладки, выбор законов управления и параметров двигателя и элементов его управления.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Теория**, расчет и проектирование авиационных двигателей и энергетических установок : Учеб. / под общей ред. В. А. Сосунова, В. М. Чепкина. М. : МАИ, 2003. 688 с.
2. **Проектирование** авиационных газотурбинных двигателей : Учеб. / под общей ред. проф. А. М. Ахмедзянова. М. : Машиностроение, 2000. 454 с.
3. **Ахмедзянов, Д. А.** Моделирование совместной работы авиационных ГТД и элементов топливной автоматики на переходных режимах в компьютерной среде DVIGw / Д. А. Ахмедзянов, Х. С. Гумеров, И. А. Кривошеев // Изв. вузов, сер. «Авиационная техника». 2002. № 1. С. 43–46.
4. **Кривошеев, И. А.** Методы и средства системной разработки сложных объектов на основе имитационного сетевого моделирования и технологии Мета-САПР / И. А. Кривошеев, Д. А. Ахмедзянов [и др.] // Приложение к журналу «Информационные технологии». 2005. № 4. 32 с.
5. **Ахмедзянов, Д. А.** Информационная технология отладки динамических процессов в авиационных ГТД при приемно-сдаточных испытаниях / Д. А. Ахмедзянов, А. Е. Кишалов // Известия вузов. Авиационная техника. 2007. № 3. С. 26–31.
6. **Ахмедзянов, Д. А.** Свид. № 2004610868. Система термогазодинамического моделирования газотурбинных двигателей на переходных режимах работы DVIGwp / Д. А. Ахмедзянов, И. А. Кривошеев, Е. С. Власова. М. : Роспатент, 2004.
7. **Ахмедзянов, Д. А.** Термогазодинамический анализ рабочих процессов ГТД в компьютерной среде DVIGw / Д. А. Ахмедзянов, И. А. Кривошеев [и др.]. Уфа : УГАТУ, 2003. 162 с.
8. **Тунаков, А. П.** САПР авиационных ГТД / А. П. Тунаков, И. А. Кривошеев, Д. А. Ахмедзянов. Уфа : УГАТУ, 2005. 272 с.

**ОБ АВТОРАХ**



**Кривошеев Игорь Александрович**, проф. каф. авиац. двигателей, науч. руковод. НИЛ САПР-Д. Дипл. инж.-мех. (УАИ, 1976). Д-р техн. наук по тепл. двигателям ЛА (УГАТУ, 2000). Иссл. в обл. автоматиз. проектирования авиац. двигателей.



**Ахмедзянов Дмитрий Альбертович**, проф. каф. авиац. двиг., зам. декана ФАД. Дипл. инж.-мех. (УГАТУ, 1997). Д-р техн. наук (там же, 2007). Иссл. в обл. раб. процессов в ГТД, мат. моделей слож. техн. объектов, САПР авиац. ГТД.



**Кишалов Александр Евгеньевич**, асп. той же каф., инж.-конст. ФГУП «НПП «Мотор». Дипл. инж.-мех. (УГАТУ, 2006). Готовит дис. в обл. автоматизации и газодин. моделирования форсажных камер сгорания авиац. ГТД.