

УДК 621.452:004

И. А. КРИВОШЕЕВ, О. Н. ИВАНОВА

## МЕТОД ФОРМИРОВАНИЯ И ИСПОЛЬЗОВАНИЯ МОДЕЛЕЙ ГТД НА РАЗЛИЧНЫХ ЭТАПАХ ПРОЕКТИРОВАНИЯ, ДОВОДКИ И ЭКСПЛУАТАЦИИ

Рассматриваются основные аспекты формирования имитационных сетевых моделей ГТД и их использования на различных этапах проектирования, доводки и эксплуатации. Описаны результаты исследования, полученные авторами в ЦИЛ САНР-Д УГАТУ, при поддержке специалистами ФГУП «ИИИ Мотор», на примере идентификации модели газотурбинной энергоустановки ГТУ-10/95. Информационные ресурсы; модели; методы создания и использования; авиационные двигатели; энергоустановки; информационная поддержка; жизненный цикл; интегрированная логистическая поддержка; CALS-технологии

На протяжении всего жизненного цикла (ЖЦ) изделия, от начала проектирования ГТД до его сдачи в серийное производство и далее, в эксплуатации, в соответствии с концепцией ИПИ/CALS, его сопровождает непрерывно развивающаяся вместе с ним математическая модель. Для поддержания целостности **единого информационного пространства** (ЕИП) в процессе доводки и эксплуатации ГТД необходимо согласовывать модели разного уровня между собой, взаимно идентифицировать модели, в том числе по результатам испытаний и контроля. Эффективность проектирования, доводки, отладки ГТД, контроля его технического состояния в эксплуатации определяется **степенью адекватности и продуктивности** используемых на этих этапах моделей. При этом различают **среднестатистические модели** конкретного типа двигателей и **индивидуальные математические модели** для конкретного экземпляра [1, 3, 6, 7]. Основной проблемой идентификации моделей на этапе доводки и в эксплуатации, при контроле состояния ГТД является **недостаток экспериментальных данных**, в связи с чем авторами предложены специальные методы и средства на основе имитационного сетевого моделирования [4, 5].

### 1. СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА

Проведенный анализ использования моделей ГТД на этапах проектирования, доводки и при контроле технического состояния в эксплуатации двигателей, рассмотрение существующих программных про-

дуктов для моделирования газотурбинных двигателей, работ специалистов ЦИАМ, ведущих ОКБ и вузов, посвященных методологии моделирования ГТД при проектировании и доводке, в том числе вопросам идентификации математических моделей (Л. Н. Дружинина, В. О. Боровика, А. М. Ахмедзянова, А. П. Тунакова и др.), показывают необходимость создания новой информационной технологии для непрерывного изменения моделей структурных элементов (СЭ), содержания и структуры моделей ГТД на разных этапах (процедурах, операциях) в рамках жизненного цикла двигателя.

### 2. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Проведенная авторами работа имела целью повышение эффективности формирования и использования моделей ГТД на различных этапах проектирования, доводки и эксплуатации. Для этого разработаны методика формирования и использования на каждом этапе жизненного цикла ГТД соответствующих имитационных сетевых моделей, методы и средства идентификации сетевых имитационных моделей ГТД и их узлов по результатам испытаний и контроля параметров двигателя в эксплуатации, учета при моделировании и идентификации погрешностей и допусков, накладываемых на значения параметров (проектные или экспериментальные), согласования локальных измерений со среднеинтегральными параметрами модели, метод последовательного сужения доверительных интервалов (области поиска решения), метод учета достоверности исходных данных и ре-



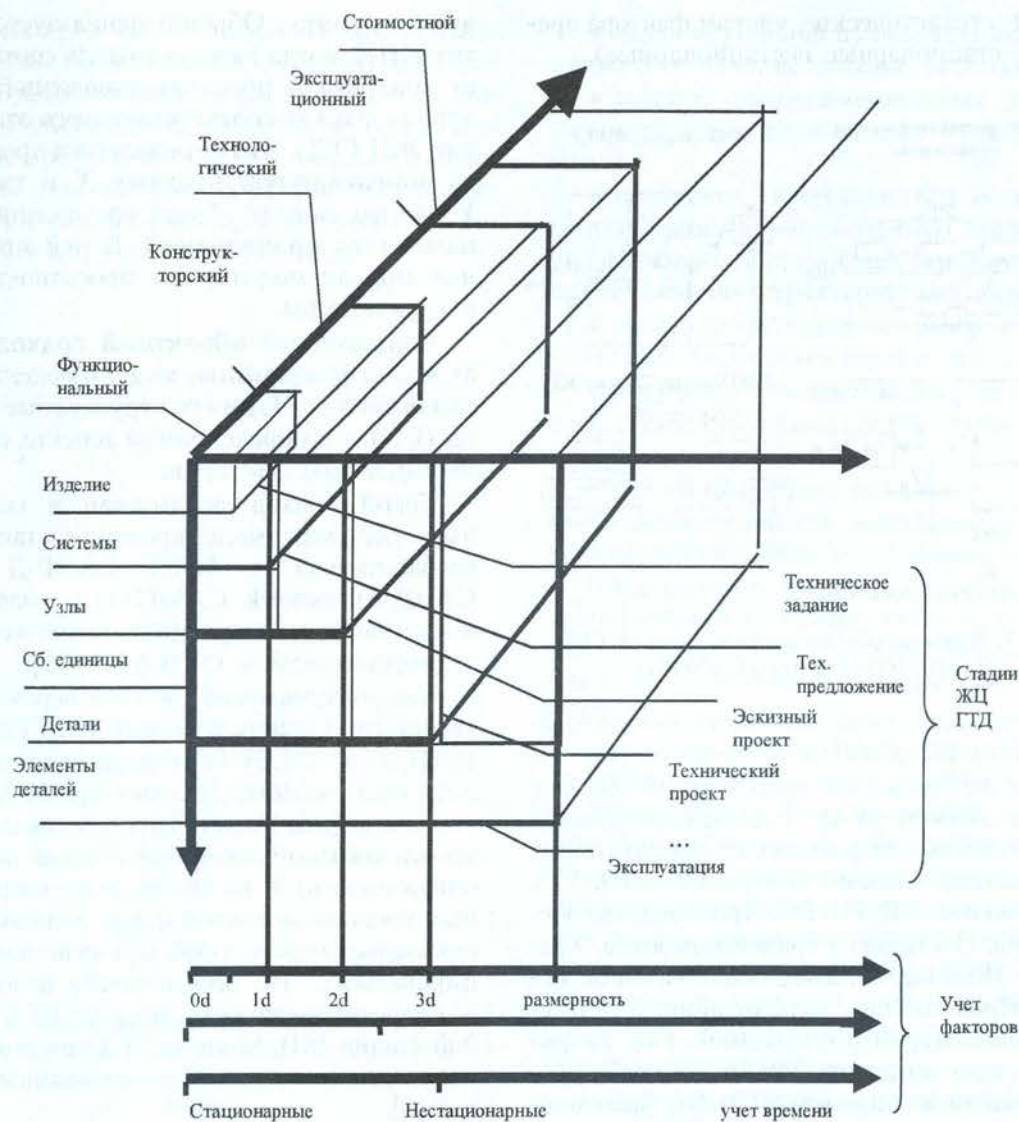


Рис. 1. Семейство математических моделей, используемых на различных этапах ЖЦ ГТД

зультатов моделирования при проектировании и доводке ГТД [9].

Апробация разработанных методов и средств проведена путем определения характеристик конкретного экземпляра ГТД и его узлов на основе экспериментальных данных. При этом использовались данные по испытаниям газогенератора (ГГ) ГТУ-10/95 (конкретного экземпляра, в составе разных сборок), предоставленные ФГУП «НПП Мотор». За предоставленные данные и полезные консультации авторы выражают благодарность специалистам бригады N 1 — А. Я. Магадееву, О. И. Болдыреву, Т. Р. Каримову.

### 3. МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

На рис. 1 показана структурная схема моделей, необходимых для информационной поддержки жизненного цикла (ЖЦ) ГТД в рамках единого информационного пространства (ЕИП), предусматриваемого в CALS (ИПИ)-технологии.

На рис. 2 показано, что каждая модель соответствует определенному элементу в структуре изделия и его частей, определенному аспекту моделирования (функциональный, конструкторский, технологический, эксплуатационный, ...), а в рамках функционального, например, термодинамика, кинематика, механика, гидравлика, ...), характеризуется учитываемыми факторами (размерность — 0d, 1d, 2d, 3d; стохастичность — детерминиро-



ванные, стохастические; учет фактора времени — стационарные, нестационарные).

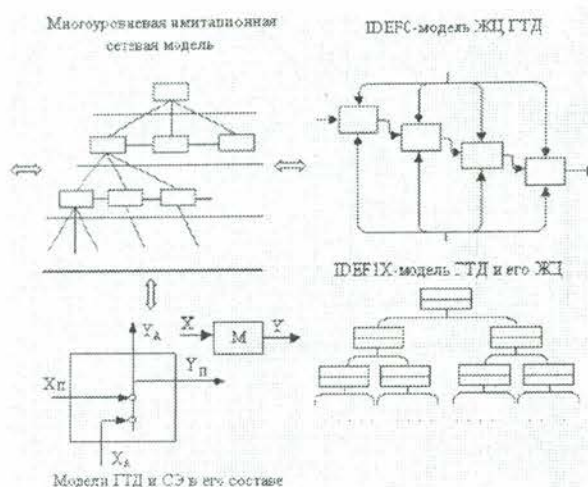


Рис. 2. Взаимная обусловленность моделей ГТД и соответствующего этапа его ЖЦ

Построение (в соответствии с методологией SADT) диаграмм, показанных на рис. 1 и 2 позволяет выделить зоны, внутри которых модели соответствуют стадиям (предпроектные исследования, разработка, эксплуатация, утилизация), этапам внутри них (ТЗ, Тех. предложение, ЭП, ТП, РП, Производство, Испытания, Поставка), (Транспортировка, Хранение, Монтаж, Отладка, Эксплуатация, Ремонт, Продолжение эксплуатации, Утилизация), процедурам и операциям. Так, например, можно выделить зоны и соответствующие модели для процедур (Выбор размерности, Выбор параметров цикла, Тепловой расчет, расчет характеристик — дроссельных, высотно-скоростных, климатических, ...)

На рис. 1 и 2 также показано, что выделение из множества моделей конкретной модели (которая, в частности, может быть, как рассматриваемая ниже, сетевой имитационной, определенной степени детализации) производится на основе IDEF0 и IDEF1X — моделей, построенных для процесса разработки ГТД (или его ЖЦ в целом), построенных для случая «как есть» («As is»). Это соответствует концепции реинжиниринга, опирается на методологию SADT и CASE-технологии. Еще более перспективно использование для этого RUP-технологии (язык UML средства Rational Rose и др.).

Семейство моделей может быть представлено набором программных модулей, связанных с ЕИП в виде базы данных (БД) по изделию. Модель изделия, представленная в БД, может иметь иерархическую или сете-

вую структуру. Обычно используется вариант ИПИ, когда каждая модель соответствует конкретной проектно-доводочной процедуре (в рамках соответствующего этапа, стадии ЖЦ ГТД). Это определяется прежде всего номенклатурой входных  $X$  и выходных  $Y$  данных модели. Такая организация ИПИ называется **процедурной**. В ней программные модули моделируют проектно-доводочные процедуры.

Современный **объектный подход** требует, чтобы программные модули моделировали сам объект — ГТД и его структурные элементы (СЭ) — в определенном аспекте, с учетом определенных факторов.

Такой подход реализован в современных системах моделирования, таких как разработанная в НИЛ САПР-Д МетаСАПР/Framework САМСТО и разработанная с участием автора приложения на ее основе (версии системы DVIG) [10–12].

Как показано выше, по мере перехода к более поздним этапам в рамках ЖЦ ГТД, для их ИПИ в составе ЕИП используется все большее число моделей разных уровней, аспектов и т. д. (это может быть и единая многоуровневая многоаспектная сетевая имитационная модель). И на любом этапе модели разных уровней, аспектов и т. д. должны согласовываться между собой (взаимно идентифицироваться). Это обеспечивает целостность и непротиворечивость модели ГТД на любой стадии ЖЦ. Модель ГТД при этом представляет совокупность согласованных моделей [8].

Для явного представления связи параметров в моделях СЭ и в модели ГТД в целом предложен следующий подход. Внутренняя структура любой модели объекта может быть представлена сетью специального вида (однонаправленный граф — ОНГ). На рис. 2 и 3 приведен пример такого представления для алгоритма СЭ. Это означает, что внутри алгоритма каждая выходная величина (вертикальное ребро) претерпевает изменения с учетом воздействия входных факторов (горизонтальное ребро — функция влияния). При этом каждому узлу сети соответствует рекуррентный оператор определенного вида, включающий  $\varphi(x)$  — функцию воздействия фактора  $x$  на выходную величину  $y$ . После каждой такой вершины на вертикальном ребре сети выходная величина  $y$  претерпевает соответствующее изменение. Внутренний алгоритм СЭ при этом превращается в линейную цепочку простых рекуррентных операторов и мо-



жет быть представлен матрицей инцидентности. Явное представление суперпозиции взаимного влияния параметров в моделях СЭ позволяет упорядочить развитие моделей элементов, произвести выбор — какие факторы должны учитываться на конкретных этапах ЖЦ, при решении конкретных проектно-дочерних и других задач (рис. 3, 4).

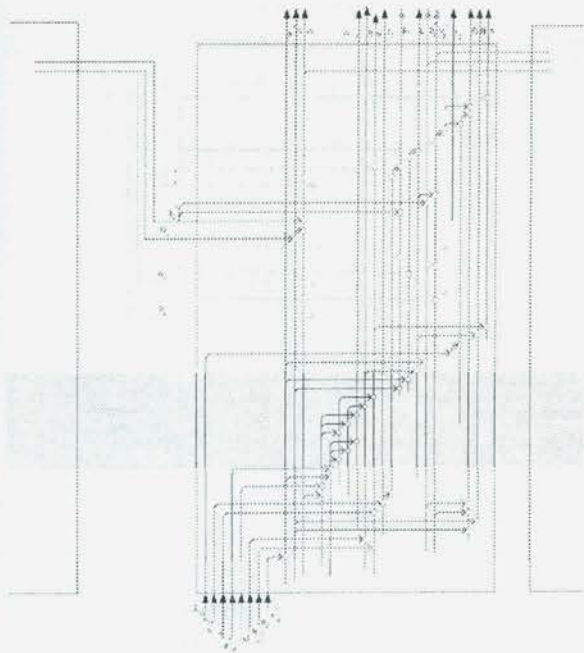


Рис. 3. Фрагмент сети, отражающий внутреннюю связь параметров в модели 2-вального ГРД (Входное устройство—Компрессор—Камера сгорания)

Разработана методика, позволяющая усовершенствовать процесс идентификации имитационной сетевой модели двигателя, в том числе решать задачи при недостатке экспериментальной информации — путем последовательного изменения в процессе идентификации структуры модели и привлечения дополнительной информации с учетом степени ее достоверности (рис. 4).

При этом идентификация модели в среде СИМ (системы имитационного моделирования) реализуется в несколько этапов:

- приведение **структуры модели** в соответствие со структурой экспериментальной информации и поэтапное изменение модели в процессе идентификации;
- анализ **корректности задач**, решаемых на каждом этапе **идентификации** с помощью сети, изображающей взаимосвязь параметров;
- формирование соответствующих **промежуточных моделей**;

- задание **условий** проведения **идентификации** (составление законов расчетов);
- задание экспериментальных значений параметров в модели (в виде функций и таблиц);
- получение (итерационным методом, на основе принципа наибольшего правдоподобия) **функций поправок для параметров «обезразмеривания» характеристик узлов**;
- введение функций поправок в модель, уточнение имеющихся характеристик узлов;
- получение **недостающих характеристик** узлов с помощью предлагаемой методики;
- последовательное **включение получаемых зависимостей** в исследуемую модель при идентификации (рис. 5).

Предложенная методика формирования и использования на каждом этапе соответствующих имитационных сетевых моделей реализована в системе моделирования DVIGw [10, 12].

Средством согласования моделей разного уровня является характеристика. Поэтому для каждого СЭ важно выделить необходимый и достаточный набор характеристик. Показано, что представление характеристик в критериальном нормализованном («обезразмеренном»), параметризованном виде обеспечивает возможность согласования моделей СЭ в составе имитационной модели, в том числе при идентификации по экспериментальным данным рис. 6.

При решении таких задач идентификации моделей ГТД важную роль играют расходные характеристики реактивного сопла и турбин. Известны опубликованные экспериментально полученные зависимости значений коэффициента расхода  $\mu_C$ , коэффициента скорости  $\varphi_C$ , коэффициента восстановления полного давления  $\sigma_C$ , коэффициента сужения струи и неравномерности потока в «горле»  $f_C$  реактивного сопла от геометрии сопла (для суживающегося — от угла наклона обечайки) и располагаемого отношения давлений  $\pi_{CP}^*$ . В данной работе с участием П. В. Сверчкова были получены картины течения в соплах с использованием 3D-моделирования в САЕ-системе KOSMOS Flow Works. Это позволило выявить особенности протекания таких зависимостей, возможности их представления в обезразмеренном параметризованном виде (рис. 7).

В таком же виде эмпирическая расходная характеристика СА турбины получена по результатам 3D-расчета (рис. 7). Они мо-



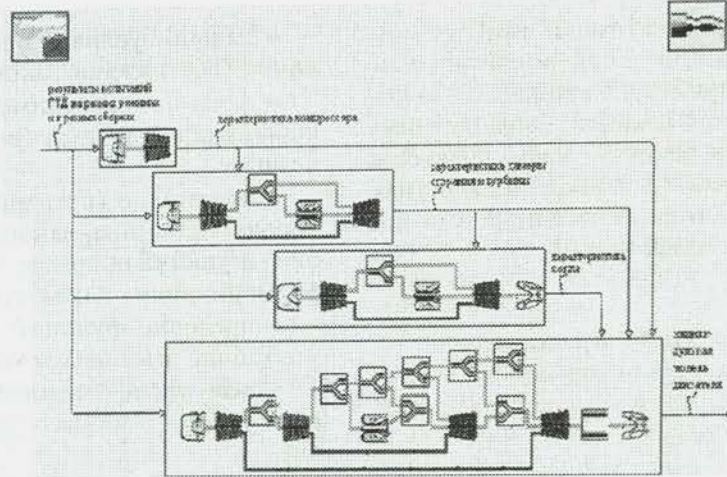


Рис. 4. Последовательное добавление в модель ГТ ГТН-10/95 узлов (в процессе идентификации)

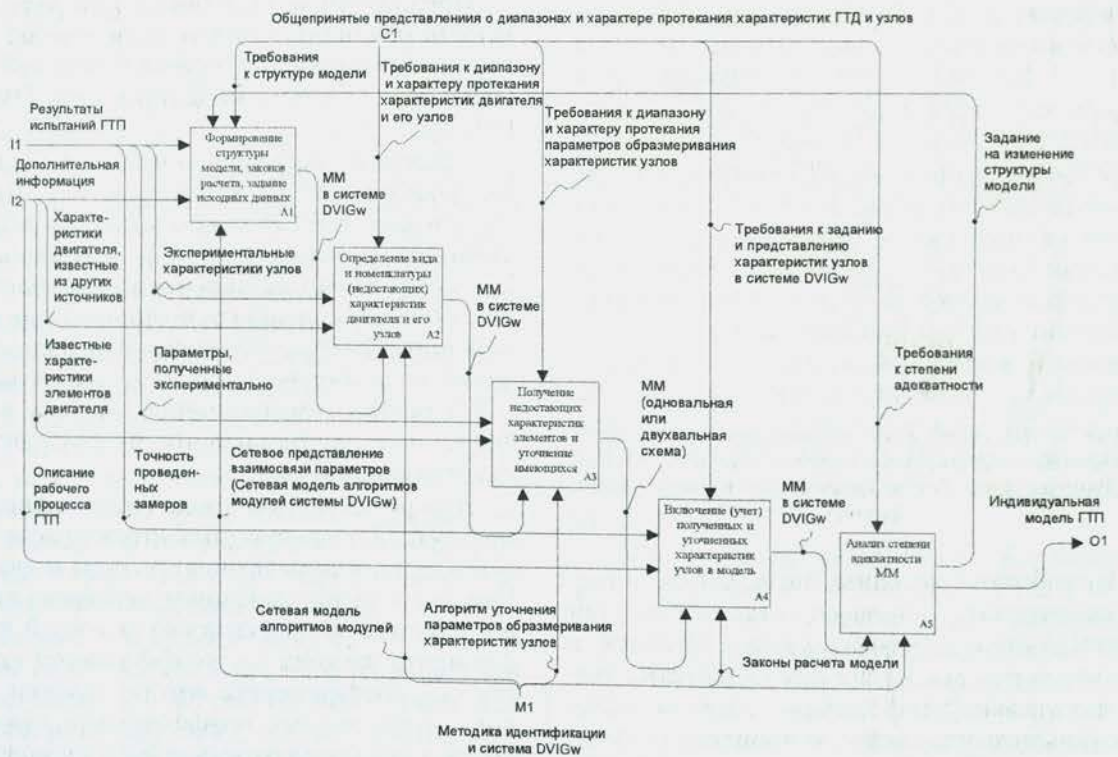


Рис. 5. IDEF0-модель идентификации модели ГТД по результатам испытаний или контроля (фрагмент 2 уровня)

гут быть получены и по результатам продувок СА, могут быть использованы данные для суживающихся сопел с соответствующим углом наклона обечайки  $\alpha$ . Как показано Г. Н. Абрамовичем,  $\mu = \sigma_T \cdot f$ , где  $f$  — коэффициент сужения (и неравномерности) струи,  $\sigma_T$  — коэффициент восстановления полного давления на участке сопла «до

$$\mu \cdot q(\lambda_{CA}) = \frac{A_T}{m F_{CA}},$$

$$A_T = \frac{G \sqrt{T_1^*}}{P_1^*} = m \cdot \mu \cdot F_{CA} \cdot q(\lambda_{CA}).$$

В работе выявлена зависимость этих параметров от отношения давлений в турбине  $\pi_T^*$  и от приведенной частоты вращения  $\frac{n}{\sqrt{T_1^*}}$ . Учтено, что при приближении ко второму критическому режиму (увеличении располагаемого отношения давлений на СА, а значит, увеличении  $\pi_T^*$ )  $\lambda_{CA} \rightarrow 1, f \rightarrow 1, \mu \rightarrow \sigma_T$ .



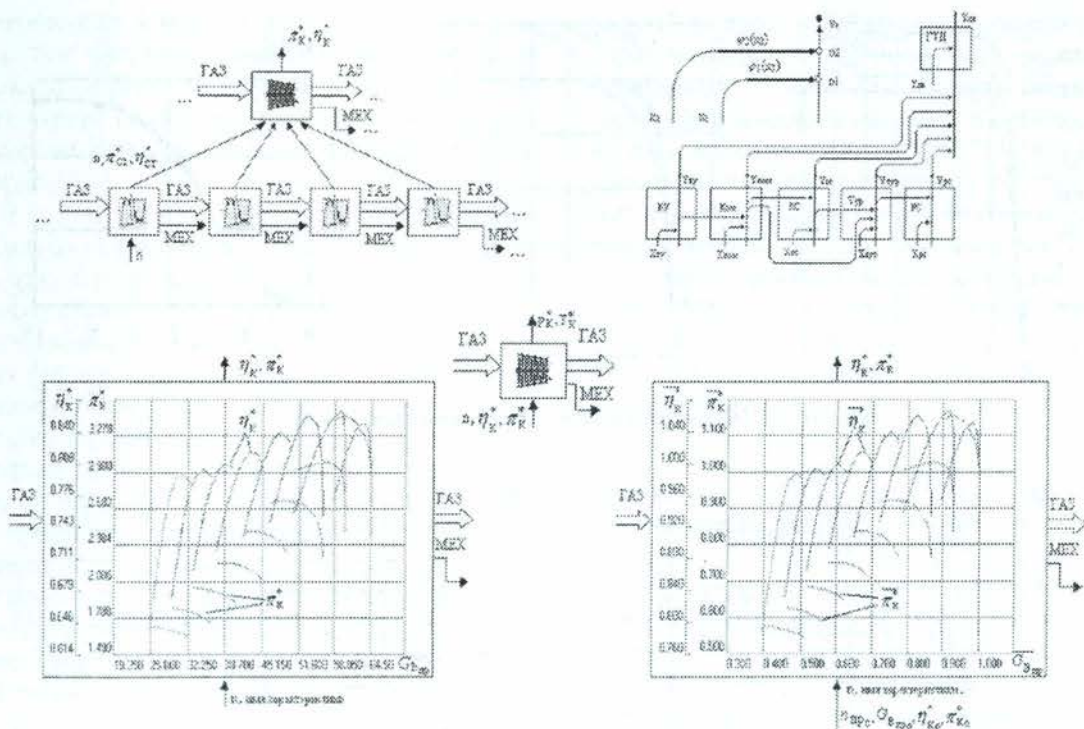


Рис. 6. Информационные связи элементов в СИМ ГТД, сетевое представление (в скалярном и векторном виде) параметров, использование характеристик в СЭ нижнего (на данном этапе формирования СИМ) уровня

Для определения недостающей при идентификации модели ГТД расходной характеристики турбины предложена следующая методика. Если для турбины известна площадь «горла» СА  $F_{CA}$  и хоть одна рабочая точка  $\{\pi_T^*, A_T\}$ , то определяется отношение  $\frac{A_T}{m F_{CA}}$  (рис. 8), далее находим  $\lambda_{CA}$ , затем  $\frac{1}{\pi(\lambda_{CA})}$ . Это позволяет построить предложенную кусочно-линейную аппроксимацию  $\frac{1}{\pi(\lambda_{CA})} = f(\pi_T^*)$  и по ней получить необходимую зависимость  $A_T = \frac{G \sqrt{T_1^*}}{P_1^*} = m \cdot \mu \cdot F_{CA} \cdot q(\lambda_{CA}) = f(\pi_T^*)$ . Таким же образом для любой известной характеристики турбины (для любой ее ветви) по ряду точек можно проверить предложенную кусочно-линейную аппроксимацию вида  $\frac{1}{\pi(\lambda_{CA})} = f(\pi_T^*)$ , проанализировать погрешности, возникающие при ее использовании.

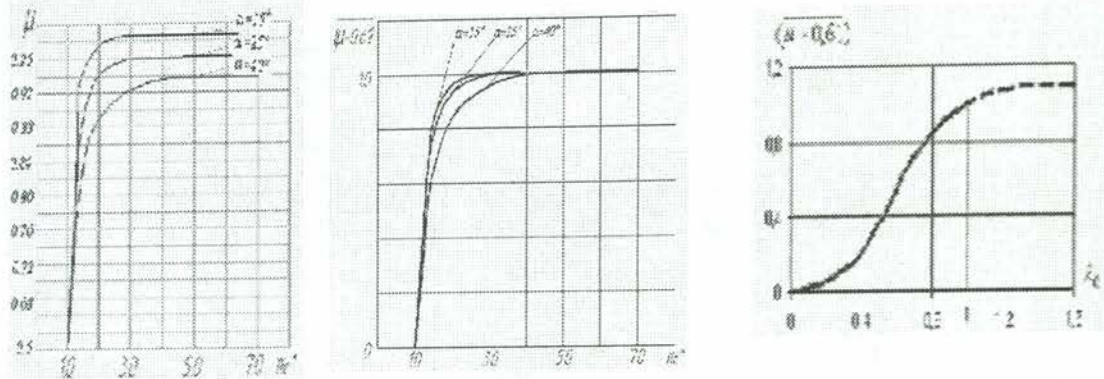
Обезразмеривание (нормализация) при представлении характеристик узлов в данной методике является необходимым этапом. Она позволяет по серии экспериментальных измерений на разных режимах определить значения параметра «образмеривания» и построить затем индивидуальную характеристику конкретного экземпляра узла как результат идентификации. Однако характеристики узлов ГТД в традиционном виде не всегда удоб-

но обезразмеривать. Для уменьшения числа параметров «образмеривания» авторами предлагается зависимости вида  $\sigma, \varphi = f(\lambda)$ ,  $\mu = f(\pi)$  переводить в вид  $(1 - \sigma) = \delta = f(\lambda)$ ,  $(1 - \varphi) = f(\lambda)$ ,  $(1 - \mu) = f(\pi)$  и далее в инвариантный безразмерный вид  $(1 - \sigma) = \bar{\delta} = f(\lambda)$ ,  $(1 - \varphi) = f(\lambda)$ ,  $(\mu - 0,61) = f(\pi)$  с единственным параметром «образмеривания», соответственно,  $(1 - \sigma)|_{\lambda=1}$  или  $\bar{\delta}|_{\lambda=1}$ ,  $(1 - \varphi)|_{\lambda=1}$ ,  $(\mu - 0,61)|_{\pi=1}$  и т. д. или, что одно и то же,  $\sigma|_{\lambda=1}$ ,  $\varphi|_{\lambda=1}$ ,  $\mu|_{\pi=1}$ .

В проведенной работе получены путем проведенного анализа типовые инвариантные обезразмеренные однопараметрические зависимости узлов ГТД (камеры сгорания, турбины, сопла). Эти же зависимости в аналитическом виде получены с помощью пакета Excel, для них подобраны полиномиальные аппроксимирующие зависимости.

Проведение анализа по ряду среднестатистических характеристик турбин двигателя Р95Ш позволило предложить для получения недостающей расходной характеристики турбины использование упомянутой кусочно-линейной аппроксимации в координатах  $= \frac{1}{\pi(\lambda_{CA})} f(\pi_T^*)$  (где индекс «СА» относится к «горлу» соплового аппарата). В таких координатах каждая ветвь, соответствующая





Результаты 3D-моделирования течения в суживающемся сопле

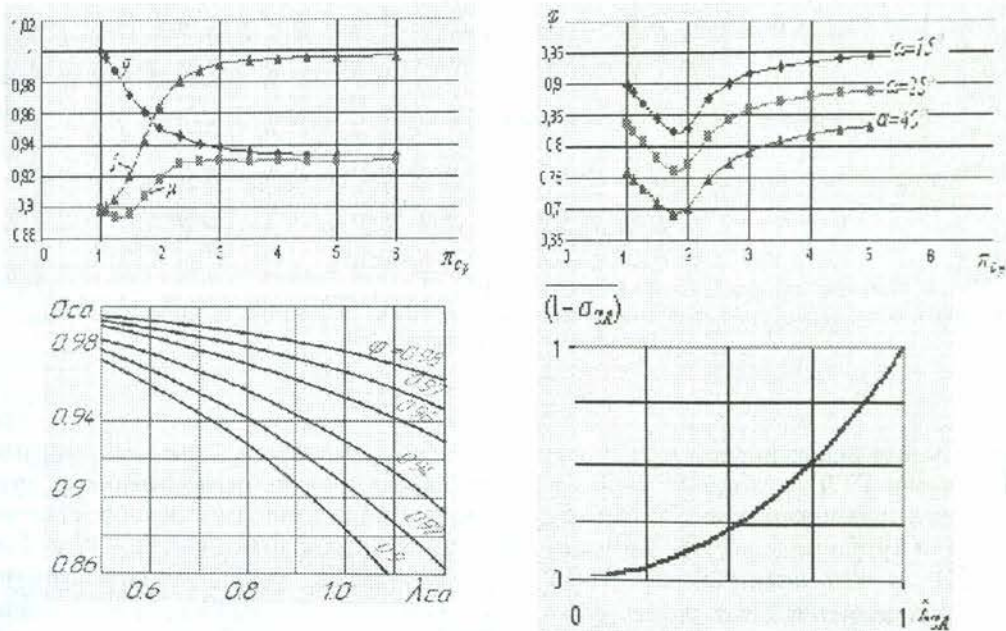


Рис. 7. Преобразования результатов 3D-моделирования для универсального безразмерного представления характеристик суживающегося сопла и СА турбины

определенной приведенной частоте вращения  $n/\sqrt{T_{T^*}} = \text{const}$ , изображается кусочнолинейной ломаной линией, состоящей из двух частей (рис. 8). Это позволяет аппроксимировать каждую ветвь  $n/\sqrt{T_{T^*}} = \text{const}$  характеристики турбины приведенной ниже универсальной зависимостью, параметрами которой являются:  $\pi_{T_{кр}}^*$  — значение  $\pi_T^*$ , выше которого пропускная способность турбины остается неизменным (поскольку в СА достигается 2-й критический режим, а в его «горле»  $\lambda_{СА}$  достигает значения 1), очевидно,  $\pi_{T_{кр}}^* = f(n)/\sqrt{T_{T^*}}$ ,  $F_{СА}$  — площадь узкого сечения («горло») соплового аппарата первой ступени турбины (или каскада),  $k$  — показатель адиабаты газа, протекающего через турбину.

Функцией является  $A_T = \frac{G_1 \sqrt{T_{T^*}}}{P_1^*}$  — пропускная способность, промежуточные функции:  $\mu_{СА}$  — коэффициент расхода СА,  $\pi(\lambda_{СА})$  — газодинамическая функция; аргумент  $\pi_T^*$  — степень понижения давления в турбине (рис. 8).

Аналогичным образом проведены преобразования для универсального безразмерного представления характеристик компрессора, камеры сгорания, входного устройства, выполненные путем преобразования системы координат, выбора «базового режима» и параметров «образмеривания».

Формировать, развивать и использовать математические модели двигателей с учетом взаимного влияния параметров и их погрешностей, на различных этапах проектирования позволяет разработанная версия системы мо-



делирования DVIGws [11]. Это реализуется путем введения блоков дополнительных операторов расчета коэффициентов влияния и взаимной связи среднеквадратических отклонений параметров в алгоритмах модулей (рис. 9).

Для взаимного согласования (идентификации) 2-, 3-мерных с 1-, 0-мерными моделями, для учета эшор распределения параметров и погрешностей системы измерения разработан и введен в модель DVIGw модуль «Датчик» (интегральный). Он имеет на входе и выходе потоки  $X_{\Pi}$  и  $Y_{\Pi}$  «Газ» (газовый) — для датчика термогазодинамических параметров. Входные данные ( $X_A$ ) содержат информацию о погрешностях измерения, о координатах приемника датчика (например  $h_d$  — расстояние по высоте от втулки ротора,  $\varphi$  — угловое положение по окружности и т. п.), коэффициенты осреднения  $K_G, K_T, K_P$ , связывающие среднеинтегральные параметры  $T^*, p^*, G$  и локальные, замеренные датчиком  $T_d^*, p_d^*, G_d$ :  $T_d^* = K_T \cdot T^*, p_d^* = K_P \cdot p^*, G_d = K_G \times G$ . Характеристика «датчика» представляет собой закон распределения «измеряемых» параметров вдоль соответствующих координат. Например, для версии DVIGw характеристика модуля «датчик» имеет вид, показанный на рис. 10.

#### 4. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Апробация разработанных методов и средств проведена при идентификации модели газотурбинного привода ГТП-10/95 ЭУ для ГТЭ-10/95 по результатам испытаний его газогенератора (ГГ) на базе двигателя P95Ш (рис. 11). При этом на основе сведений об объекте средствами системы DVIGw сформирована модель ГГ для ГТП-10/95. В соответствии с разработанной технологией связь замеренных, определенных из дополнительных источников и подбираемых параметров элементов в имитационной модели ГГ ГТП-10/95 представлена на рис. 12. Они выделены (цветом) в наборах входных и выходных данных и среди параметров, передающихся по потокам (в данном случае газовым и механическим).

Поскольку при испытаниях параметры между каскадами (турбин и компрессоров) не замерялись, рассмотрено, насколько продуктивно на первом этапе идентификации использовать условно одновальную модель. Для этого рассмотрена взаимосвязь параметров модели двухвального ГТД и его модели, условно представленной, как одноваль-

ной. При этом в одновальном варианте отборы и подводы рабочего тела заданы как суммарные. Изначально область поиска решения для каждого параметра определяется по физическому смыслу ( $\mu, \varphi, \eta, \sigma < 1$ ), ожидаемое значение определяется по среднестатистическим параметрам данного типа двигателя, аналога и т. п. Это касается и ограничений второго рода для искомым характеристик узлов и линий рабочих режимов (ЛРР). В результате идентификации на первом этапе получены ЛРР на характеристиках камеры сгорания и сопла. Далее с использованием этих ЛРР получены функции изменения (на каждом режиме) значений параметров образмеривания априорно взятых (среднестатистических для двигателя P95Ш «безразмерных» характеристик) параметров «образмеривания» характеристик КНД и КВД. Это позволило получить индивидуальные характеристики компрессоров для рассматриваемого экземпляра ГГ ГТП-10/95, хотя это решение (из-за недостатка экспериментальных данных) является не единственным. Обнаружено, что подобранные значения «параметров образмеривания» дрейфуют (имеют тренд) по режимам (по ПЗР — параметру  $n_{\text{црКНД}}$ ). Но подбираемые «нережимные» параметры не должны иметь тренд по режимам. Поэтому предложено отыскивать комбинации значений таких параметров итерационным способом на основе принципа наибольшего правдоподобия (когда этот тренд для всех подбираемых параметров минимален). В работе таким образом проведено дальнейшее итерационное определение значений параметров «образмеривания» характеристик КНД и КВД и выбрать единственное наиболее правдоподобное решение.

На рис. 13 приведены результаты итераций по определению наиболее правдоподобного сочетания значений параметров «образмеривания» характеристики компрессоров (КНД и КВД). Часть подбираемых параметров при этом варьировалась, другая временно «замораживалась», затем группы менялись ролями с использованием полученных на предыдущем шаге результатов. При этом получена комбинация значений, для которых  $\pi_{\text{КНД}0}^*, G_{\text{Впр}0}, \eta_{\text{КНД}0}^*, n_{1\text{пр}0} = f(n_1) \approx \text{const}$  и  $\pi_{\text{КВД}0}^*, G_{\text{КВДпр}0}, \eta_{\text{КВД}0}^*, n_{2\text{пр}0} = f(n_1) \approx \text{const}$ .

Это позволило получить наиболее правдоподобные индивидуальные характеристики КНД и КВД (для данного экземпляра ГГ ГТП-10/95), построить их с использованием полученных при идентификации значений



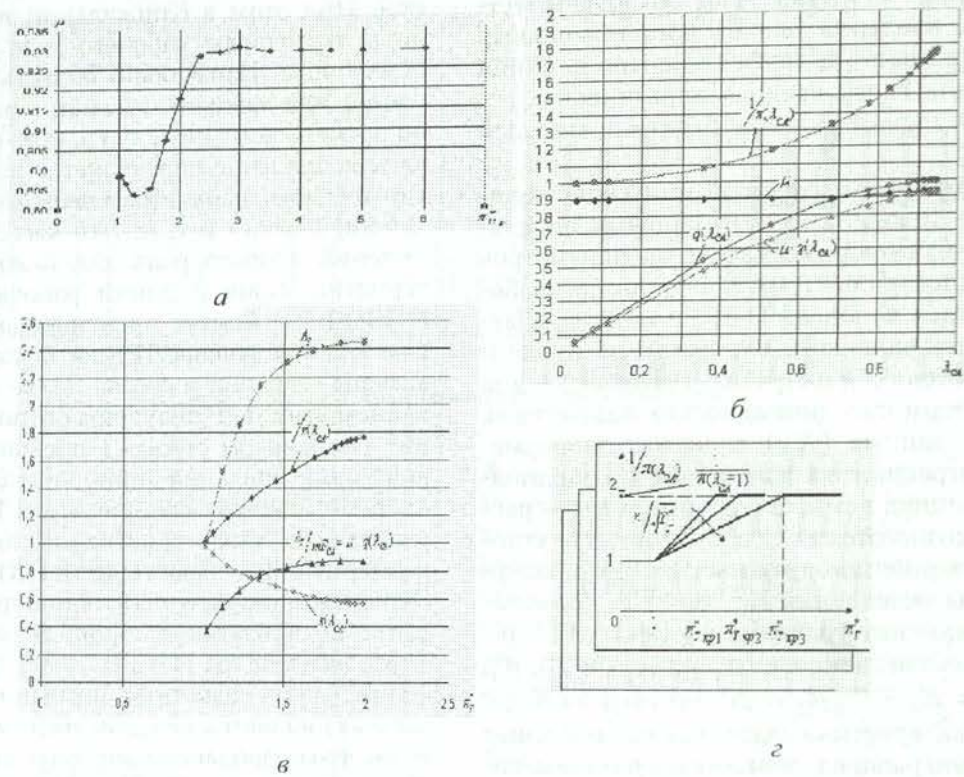


Рис. 8. Получение и представление в универсальном виде характеристик узлов (на примере характеристик турбины и сопла): а — коэф. расхода  $\mu = f(\pi_{cp})$  суживающегося сопла с углом наклона обечайки 15°; б — зависимости  $\mu, q(\lambda_{CA}), \mu \cdot q(\lambda_{CA}), \frac{1}{\pi(\lambda_{CA})} = f(\lambda_{CA})$  для суживающегося сопла и СА турбины; в — зависимости  $A_T, \frac{A_T}{mq(\lambda_{CA})}, \mu \cdot q(\lambda_{CA}), \pi(\lambda_{CA}), \frac{1}{\pi(\lambda_{CA})} = f(\pi_T^*)$  для турбины; з — кусочно-линейная аппроксимация  $\frac{1}{\pi(\lambda_{CA})} = f(\pi_T^*, n/\sqrt{T_T^*})$

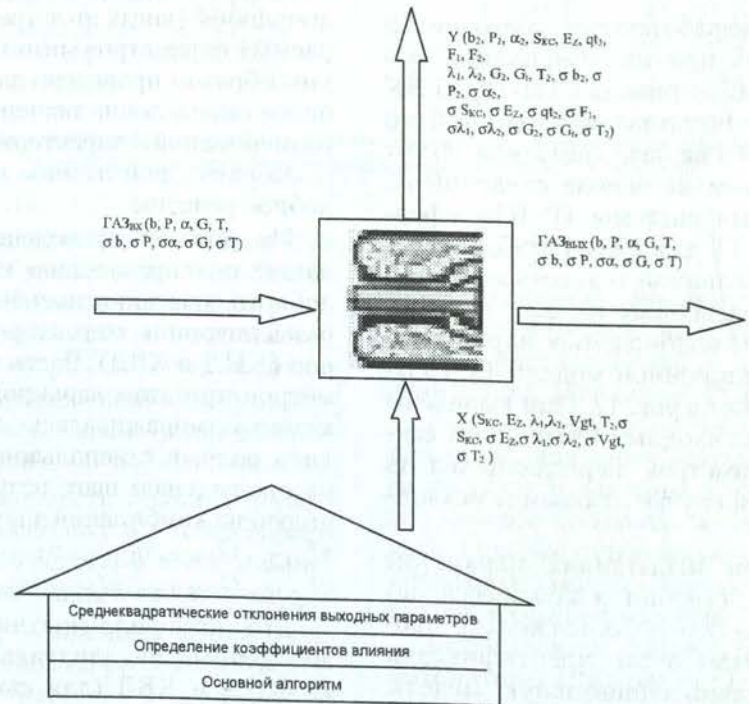
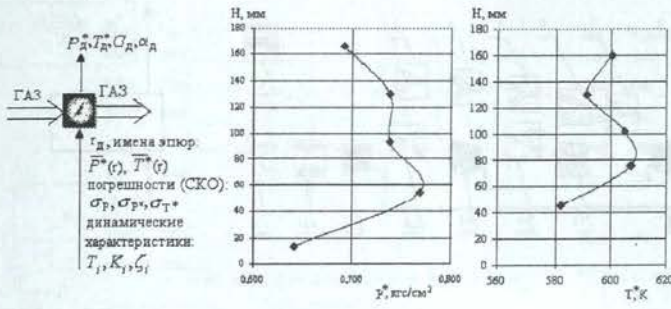
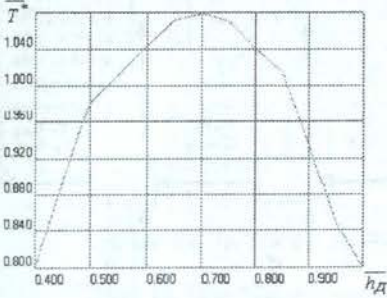


Рис. 9. Результаты модификации модуля «Камера сгорания» для моделирования двигателей и энергоустановок с учетом стохастичности в системе DVIGws

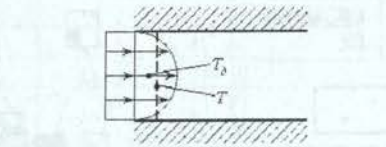




Информационные связи модуля «Датчик»: учет формы эпор заторможенных давления и температуры, расположения датчика,

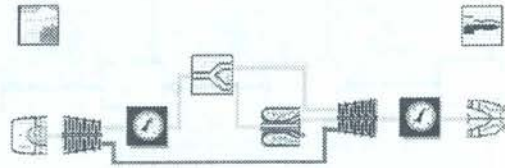


Характеристика модуля «Датчик» в системе



Поперечная неравномерность газового потока  
Вариант осреднения давления по расходу

$$P^* = \frac{\int_{r_{ст}}^{r_k} P^*(r) \cdot \frac{c(r)P(r)}{RT(r)} \cdot r \cdot dr}{\int_{r_{ст}}^{r_k} \frac{c(r)P(r)}{T(r)} \cdot r \cdot dr};$$



Модель двигателя РД-9Ф в системе DVIGw

Рис. 10. Введение в СИМ ГТД СЭ «Датчик» для учета неравномерности потока, расположения датчика, статической, динамической и случайной погрешностей измерений

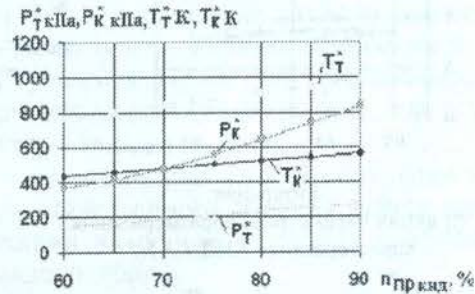
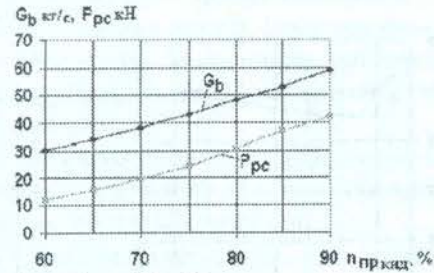
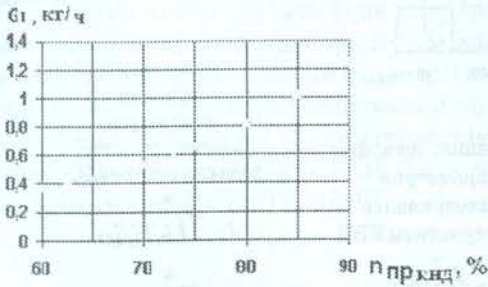
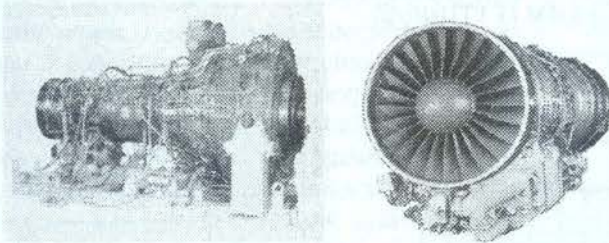


Рис. 11. Экспериментально полученные зависимости, использованные при идентификации модели ГТД-10/95 ЭУ ГТЭ-10/95 и его ГТ на базе двигателя Р95Ш

параметров их «образмеривания» (рис. 14). При этом обнаружено: если априорно взятые характеристики узлов по виду близки к фактическим характеристикам испытываемого экземпляра двигателя (узла), то при «образмеривании» с помощью найденных значений «параметров образмеривания» они лишь деформируются и изменяют масштабы вдоль соответствующих осей в соответствующей системе координат.

### 5. ПРИЛОЖЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ. СОПОСТАВЛЕНИЕ ПОЛУЧЕННОЙ ИНДИВИДУАЛЬНОЙ МОДЕЛИ ГТ ДЛЯ ГТД-10/95 С РЕЗУЛЬТАТАМИ ИСПЫТАНИЙ

Оценка степени (и области) адекватности полученной индивидуальной модели должна производиться сравнением результатов моделирования и испытаний этого же экземпляра ГТ, но на других режимах, в других климатических условиях, в составе ГТЦ, ГТУ и т. д. В работе такие сравнения проводились с ре-



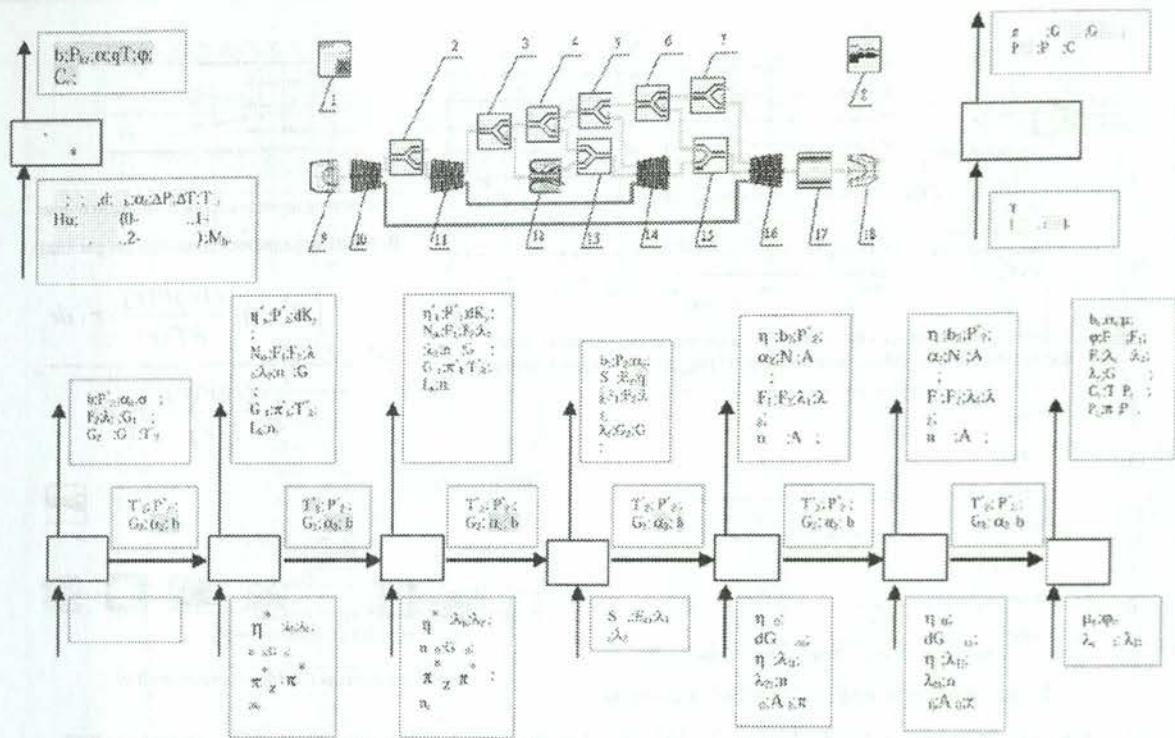


Рис. 12. Связь замеренных, определенных из дополнительных источников и подбираемых параметров СЭ в ИМ ГТ ГП-10/95

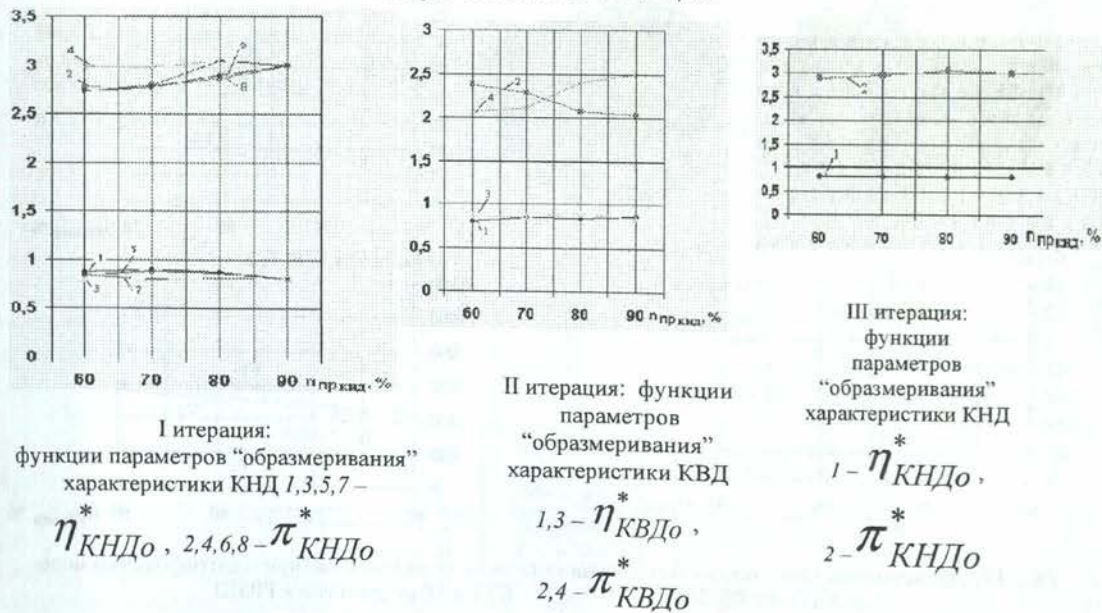


Рис. 13. Результаты проведения итераций по определению наиболее правдоподобного сочетания значений параметров «образмеривания» характеристик компрессоров

зультатами испытаний (рис. 15) и с результатами моделирования по модели ГТ ГП-10/95 в системе ГРАД, идентифицированной работниками бригады N 1 ФГУП «НПП Мотор» по большому массиву имеющихся у них экспериментальных и расчетных данных. Обнаружено, что полученная в проведенной работе с использованием минимального количества

экспериментальных данных индивидуальная модель имсет высокую степень адекватности. А с использованием располагаемого ОКБ экспериментального материала и опыта их работников разработанные методы и средства могут дать еще больший эффект.

Для проверки эффективности разработанной системы моделирования DVIGws прове-



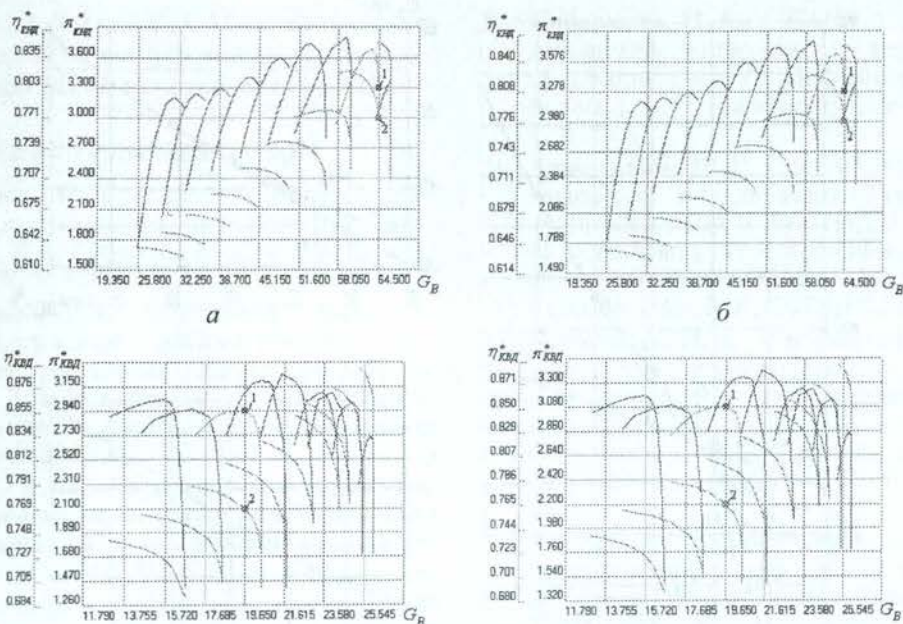


Рис. 14. Идентифицированные в первой и третьей итерации характеристики КНД (а) и КВД (б) с первоначальными и уточненными параметрами «образмеривания» (1 —  $\eta_{KND}^*$  и 2 —  $\pi_{KND}^*$ )

дено моделирование ГТ ГТП-10/95 с учетом случайных отклонений при измерении параметров. Была произведена оценка погрешностей определения части параметров (на основе метрологического анализа, анализа методик косвенного определения значений и т. д.). Добавление данных о погрешностях этих параметров в модель в DVI Gws: для входных параметров непосредственно, а для выходных параметров через закон расчета (как поддерживаемые константы при подборе путем вариации погрешностей остальных входных параметров) позволило при моделировании получить не только значения (математические ожидания), но и погрешности (СКО) для всех остальных параметров ГТ ГТП-10/95.

## ВЫВОДЫ

Разработанная методика поэтапного формирования моделей авиационных ГТД путем согласования структуры модели с номенклатурой проектных и экспериментальных данных, последовательного изменения структуры модели на основе получаемых результатов, упорядоченного привлечения дополнительной информации с учетом степени ее достоверности, позволяет получать индивидуальные модели требуемой степени адекватности, использовать их при проектировании, доводке, контроле технического состояния в эксплуатации. Она позволяет решать задачи при недостатке проектной и эксперименталь-

ной информации. Оригинальными в разработанной методике идентификации являются:

- способ представления универсальных параметризованных характеристик узлов и ГТД в целом;
- алгоритм получения характеристик турбины (и ее каскадов) на основе предложенного метода ее аппроксимации;
- алгоритм получения для конкретного изделия характеристик узлов и двигателя в целом на основе анализа изменения на разных режимах параметров «образмеривания» априорно взятых (по прототипу, аналогу) характеристик.
- итерационный способ получения и выбора единственного решения задачи идентификации на основе принципа наибольшего правдоподобия.

Предложенная CASE-технология сетевого представления взаимосвязи параметров в моделях структурных элементов и в модели ГТД в целом позволяет анализировать корректность проектных и идентификационных задач, определять последовательность идентификации, выделяя фрагменты с наименьшей неопределенностью; учитывать при проектировании и доводке ГТД характер взаимного влияния параметров.

Разработанные системы моделирования для термогазодинамического анализа рабочих процессов ГТД, имеющие модульный принцип, позволяют:



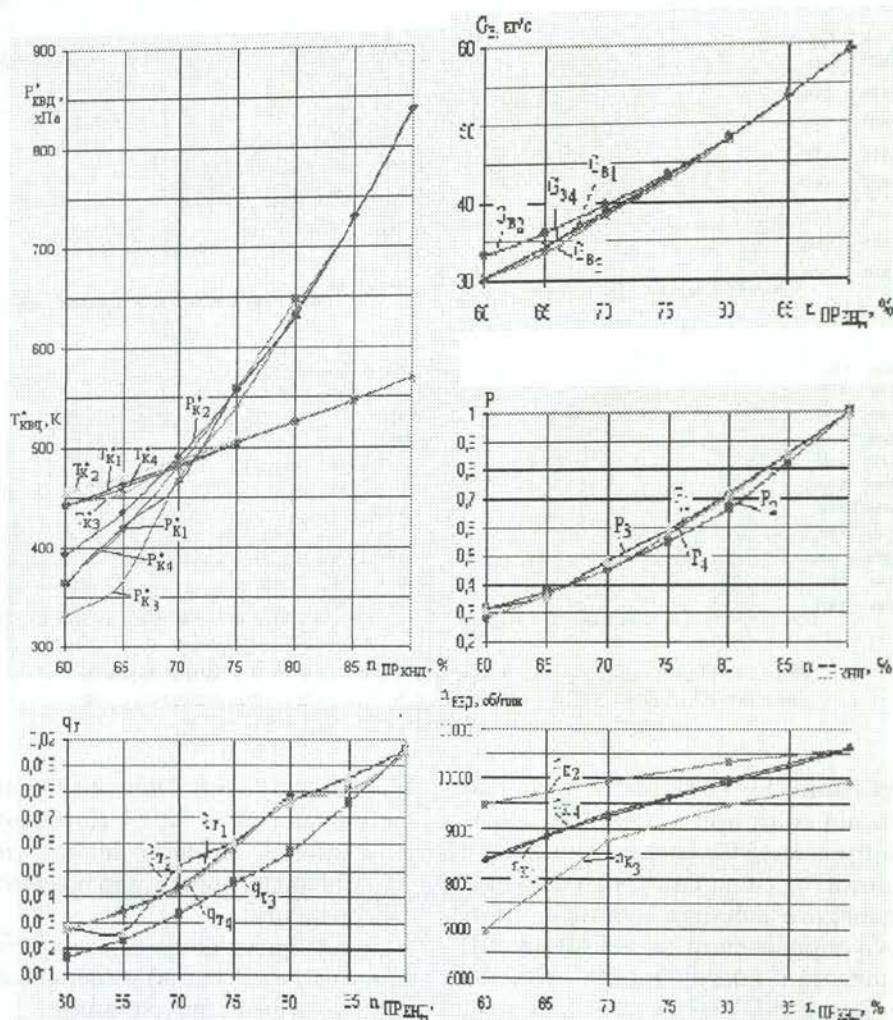


Рис. 15. Сопоставление полученной индивидуальной модели ГТ для ГТД-10/95 с результатами испытаний: 1 — эксперимент; 2 — расчет по модели с априорными характеристиками узлов; 3 — расчет по модели после уточнения характеристик КВД, КС, РС; 4 — расчет по модели после уточнения характеристик КВД, КНД, КС, РС

- решать задачи идентификации при проектировании, доводке и эксплуатации с использованием СИМ;

- решать задачи идентификации СИМ ГТД с учетом погрешностей экспериментальных данных (на основе анализа каналов измерений, спектров разброса результатов измерений);

- решать проектно-доводочные задачи с учетом допусков, накладываемых на параметры, степени достоверности входных данных и погрешности результатов моделирования.

Разработанные методы и средства позволяют формировать и эффективно использовать на каждом этапе ЖЦ ГТД соответствующие СИМ и за счет этого сократить издержки и повысить качество разработки авиационных двигателей и энергоустановок.

Апробация разработанной методики произведена путем идентификации модели конкретного экземпляра газогенератора газотурбинного привода ГТД-10/95 (на основе двигателя Р95Ш) по результатам его испытаний на разных режимах, в составе разных сборок. На основе полученных результатов и анализа эффективности разработанной методики сформулированы практические рекомендации по ее применению в различных проектно-доводочных ситуациях.

Результаты апробации предложенных методик и алгоритмов внедрены в ФГУП «НПП «Мотор», а также в учебном процессе УГАТУ и СГАУ.

Предложенная методика формирования и использования на каждом этапе соответствующих имитационных сетевых моделей позволяет повысить эффективность информации-



онной поддержки (ИПИ/CAIS) жизненного цикла ГТД и соответствует концепции единого информационного пространства (ЕИП).

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Кривошеев, И. А.** Автоматизированные системы проектирования авиационных двигателей / И. А. Кривошеев, Д. А. Ахмедзянов. Уфа: УГАТУ, 2002. 61 с.
2. **Ахмедзянов, Д. А.** Динамика развития и использования математических моделей на различных этапах разработки ГТД / Д. А. Ахмедзянов, И. А. Кривошеев, О. Н. Иванова // Известия вузов. Авиационная техника. 2003, № 3, С. 71–73.
3. **Вавилов, А. А.** Имитационное моделирование производственных систем / под ред. А. А. Вавилова. М.: Машиностроение; Берлин: Техника, 1983. 416 с.
4. **Кривошеев, И. А.** Использование средств имитационного сетевого моделирования ГТД на этапе идентификации моделей по результатам испытаний / И. А. Кривошеев, О. Н. Иванова, И. М. Горюнов // Вестник УГАТУ. 2005. Т. 6, № 1(12), С. 65–75.
5. **Кривошеев, И. А.** Методы и средства системной разработки сложных объектов на основе имитационного сетевого моделирования и технологии МЕТА-САПР / И. А. Кривошеев, Д. Г. Кожин, И. М. Горюнов [и др.] // Приложение к журналу «Информационные технологии». 2005. № 4. С. 1–31.
6. **Чуян, Р. К.** Методы математического моделирования двигателей летательных аппаратов: учеб. пособие для студ. авиадвигателестроит. спец. вузов / Р. К. Чуян. Машиностроение, 1988. 288 с.
7. **Советов, Б. Я.** Моделирование систем / Б. Я. Советов, С. А. Яковлев. М.: Высш. шк., 2001. 343 с.
8. **Кривошеев, И. А.** Решение задач идентификации, проектирования и управления с использованием сетевых имитационных моделей / И. А. Кривошеев, Д. Г. Кожин, О. Н. Иванова // Труды междунар. научн.-техн. конф. по обратным задачам. М. 2004. С. 75–80.
9. **Кривошеев, И. А.** САПР авиационных двигателей: состояние и перспективы / И. А. Кривошеев // Информационные технологии. М.: Машиностроение, 2000. № 1. С. 8–15.
10. **Ахмедзянов, Д. А.** Система термодинамического моделирования газотурбинных двигателей (DVIGw) / Д. А. Ахмедзянов, И. М. Горюнов, И. А. Кривошеев [и др.] // Программа для ЭВМ № 2004610624 от 04.03.2004. М.: РОСПАТЕНТ, 2004.
11. **Кривошеев, И. А.** Система моделирования газотурбинных двигателей для решения проектно-доводочных задач с учетом погрешности данных (DVIGws) / И. А. Кривошеев, О. Н. Иванова // Программа для ЭВМ № 2004610473 от 18.02.2004. М.: РОСПАТЕНТ, 2004.
12. **Ахмедзянов, Д. А.** Термодинамический анализ рабочих процессов ГТД в компьютерной среде DVIGw: учеб. пособие (с грифом УМО РФ) / Д. А. Ахмедзянов [и др.]. Уфа: Уфимск. гос. авиац. техн. ун-т, 2003. 162 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.



**Иванова Ольга Николаевна**, ст. преп. каф. прикладной гидромеханики УГАТУ. Дипл. магистр техники и технологий по напр. «Авиационное ракетостроение» (УГАТУ, 2000), канд. техн. наук по тепловым двигателям (УГАТУ, 2006). Иссл. в обл. имитационного моделирования, идентификации, стохастичности в САПР.