

УДК 629.452.3

И. А. КРИВОШЕЕВ

ИНТЕГРИРОВАННАЯ СИСТЕМА ДЛЯ РАЗРАБОТКИ ДВИГАТЕЛЕЙ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ НА ОСНОВЕ CAD/CAM/CAE/PDM-ТЕХНОЛОГИЙ

Рассматриваются результаты работ по созданию компьютерной среды, обеспечивающей системную автоматизированную разработку двигателей с использованием CAD/CAM/CAE/PDM-систем, при которой структура и содержание многоуровневой и многоаспектной объектной модели динамически формируются в процессе проектирования, изготовления и доводки. Приведены результаты использования средств сетевого имитационного моделирования и поддержки принятия проектных решений на этапе функционального проектирования ГТД, идентификации моделей по результатам испытаний, на этапе конструкторского проектирования. Описана структура компьютерной среды авиамоторного ОКБ, методы ее создания и внедрения. *Информационная поддержка; проектирование; изготовление; доводка; двигатели летательных аппаратов; системное автоматизированное проектирование; имитационное сетевое моделирование*

ВВЕДЕНИЕ

Проект «Интегрированная система для разработки двигателей летательных аппаратов на основе CAD/CAM/CAE/PDM-технологий» выполняется в НИЛ САПР-Д УГАТУ в рамках научно-технической программы «Научные исследования высшей школы по приоритетным направлениям науки и техники», подпрограмма: 201 «Производственные технологии».

Цель проекта: совершенствование методологии проектирования и доводки двигателей летательных аппаратов на основе использования CALS (CAD/CAM/CAE/PDM)-технологии, имитационных моделей и систем поддержки принятия решений.

Научные исследования и практическая работа в рамках данного проекта ведутся по следующим направлениям:

- проведение системного анализа и построение моделей процесса проектирования и доводки двигателей летательных аппаратов (ракетных, авиационных), учитывающих все возрастающие требования к перспективным ЛА;
- разработка концепции системного проектирования и доводки ДЛА с динамическим формированием многоуровневой многоаспектной модели двигателя и его окружения (технологического и т.п.), с передачей гра-

фиц области поиска решения и критериев оптимизации в нижележащие уровни, с определением вероятности выигрыша отдельных структурных вариантов;

- формирование алгоритмов выполнения обобщенных проектно-доводочных процедур и их реализация в виде универсальной управляющей программы – решателя (процессора), обрабатывающего многоуровневую многоаспектную модель двигателя (дерево проекта);

- установление последовательности и разработка системы поддержки принятия проектных решений (СППР) при формировании модели ДЛА в виде дерева проекта;

- разработка метода формирования, развития и использования математических моделей структурных элементов и их библиотек на разных стадиях создания ДЛА;

- разработка методов организации параллельной работы специалистов при проектировании и доводке ДЛА;

- разработка технологии накопления, систематизации и использования опыта проектирования и доводки двигателей летательных аппаратов (ракетных, авиационных).

АНАЛИЗ ПРОБЛЕМЫ

За рубежом (США, Объединенная Европа) этому вопросу уделяется большое внима-

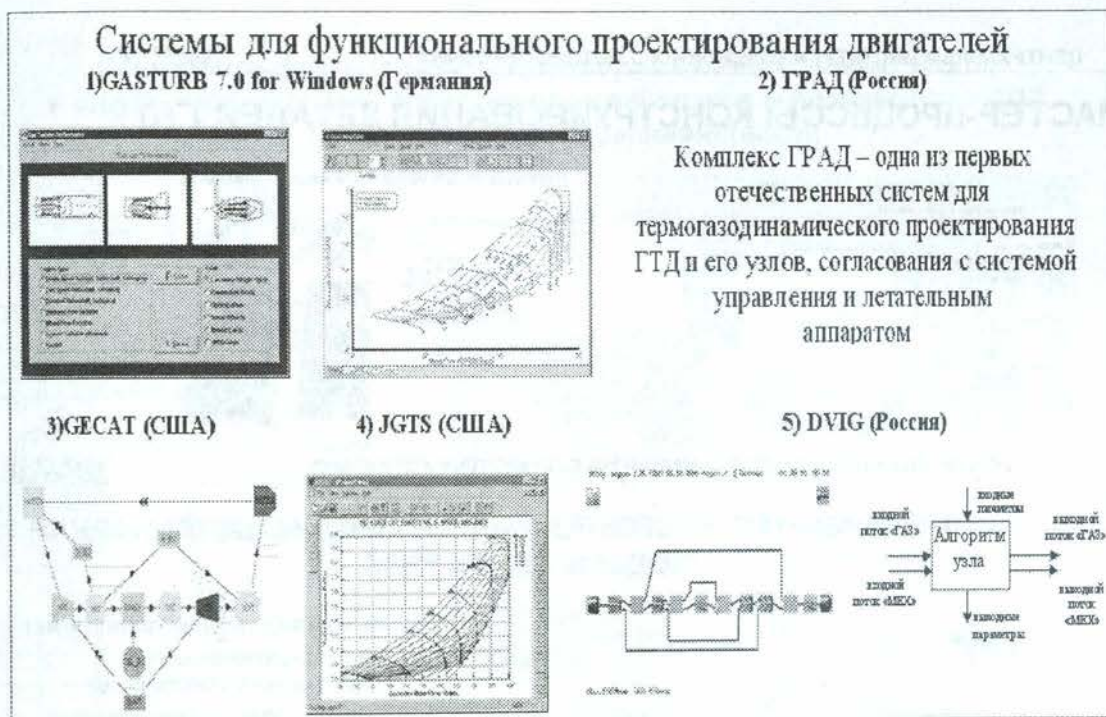


Рис. 1

ние. Выделяется по 200–150 млн дол., в работе участвуют солидные фирмы и университеты. В числе таких программ:

Федеральные программы США:

- NPSS 1990–2010, NCP (14 фирм, 4 двигательные + 1 самолетная + 10 software + университеты, бюджет 200 млн дол., головная организация NASA Glenn).

Основные результаты:

- Последовательные версии распределенной многоуровневой модели двигателя (NPSS v. 1, NPSS v. 2, NPSS v. 3).

- Программно-аппаратные комплексы на базе программ APNASA, ADPAC и NCC расчета течения в тракте двигателя в 3D-постановке.

Объединенная Европа:

VERTIGO, ECP, VIVACE (20 фирм, 3 двигательных + 1 самолетная фирмы, 17 software + университеты), 150 млн дол., головные Rolls-Royce, SNECMA, AIRBUS.

Объявленная цель упомянутых программ: создание промышленного программного продукта — среды разработки и поддержки авиационного ГТД на всех стадиях жизненного цикла, обеспечивающего повышение конкурентоспособности создаваемых двигателей.

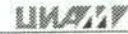
Как видим, цель этих федеральных программ та же, что и обозначенная в выполняемом проекте — создание промышленной компьютерной среды информационной поддерж-

ки изделий (ИПИ), в том числе интегрированной логистической поддержки (ИЛП) для повышения конкурентоспособности создаваемых двигателей. Насколько важное значение придается разработкам такого рода за рубежом, говорит тот факт, что создаваемые в США системы функционального (термогазодинамического) моделирования ГТД (GECAT, JGTS) Конгресс запретил передавать за пределы Соединенных Штатов. С немецкими разработчиками системы Gasturb авторы данного проекта взаимодействуют, так же как и с коллегами из КГТУ (система ГРАД [7]). В рамках данного проекта в НИЛ САПР-Д развивается система DVIG [11] (рис. 1).

В России (в ЦИАМе) регулярно проводятся отраслевые совещания по автоматизации проектирования ГТД, на эти совещания авторов данного проекта приглашают как специалистов. При этом обсуждаются мастер-процессы конструирования деталей ГТД, разноуровневые поузловые модели, распределенная многоуровневая междисциплинарная модель двигателя и двухуровневая структура системы проектирования (рис. 2). Однако вопрос о средствах объединения этих компонент в единую технологию остается открытым.

В настоящее время в мире различными фирмами разрабатывается много различных систем и технологий (CAD/CAM/CAE/

ЦЕНТРАЛЬНЫЙ ИНСТИТУТ АВИАЦИОННОГО МОТОРОСТРОЕНИЯ



МАСТЕР-ПРОЦЕССЫ КОНСТРУИРОВАНИЯ ДЕТАЛЕЙ ГТД



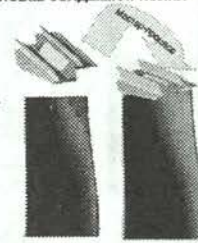
Автоматическая установка бандажной полки

Задача:
Разместить бандажную полку на торце вала.

Условия:

1. Центр тяжести полки должен располагаться в определенной точке радиального сечения вала.
2. Ребра полки образовать заданный радиальный зазор с поверхностью корпуса турбины.

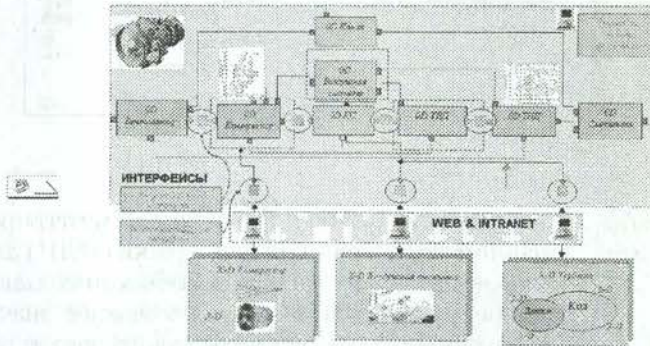
Результат:
Созданы две модели с 1:4, 2:4, 3:4, 4:4, 5:4, 6:4, 7:4, 8:4, 9:4, 10:4, 11:4, 12:4, 13:4, 14:4, 15:4, 16:4, 17:4, 18:4, 19:4, 20:4, 21:4, 22:4, 23:4, 24:4, 25:4, 26:4, 27:4, 28:4, 29:4, 30:4, 31:4, 32:4, 33:4, 34:4, 35:4, 36:4, 37:4, 38:4, 39:4, 40:4, 41:4, 42:4, 43:4, 44:4, 45:4, 46:4, 47:4, 48:4, 49:4, 50:4, 51:4, 52:4, 53:4, 54:4, 55:4, 56:4, 57:4, 58:4, 59:4, 60:4, 61:4, 62:4, 63:4, 64:4, 65:4, 66:4, 67:4, 68:4, 69:4, 70:4, 71:4, 72:4, 73:4, 74:4, 75:4, 76:4, 77:4, 78:4, 79:4, 80:4, 81:4, 82:4, 83:4, 84:4, 85:4, 86:4, 87:4, 88:4, 89:4, 90:4, 91:4, 92:4, 93:4, 94:4, 95:4, 96:4, 97:4, 98:4, 99:4, 100:4.



ЦЕНТРАЛЬНЫЙ ИНСТИТУТ АВИАЦИОННОГО МОТОРОСТРОЕНИЯ



РАСПРЕДЕЛЕННАЯ МНОГОУРОВНЕВАЯ МЕЖДИСЦИПЛИНАРНАЯ МОДЕЛЬ ДВИГАТЕЛЯ



Базовые стандарты и технологии:

- UML – проектирование программного обеспечения
- CORBA – обеспечение сетевого взаимодействия;
- MFC, FLTK, Java – многоплатформенность (платформонезависимость)
- XML – конфигурационные файлы
- MySQL (Oracle) – библиотеки компонент и управление данными

ЦЕНТРАЛЬНЫЙ ИНСТИТУТ АВИАЦИОННОГО МОТОРОСТРОЕНИЯ



РАЗНОУРОВНЕВЫЕ УЗЛОВЫЕ МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ И ОПЫТ ИХ ПРИМЕНЕНИЯ

Каналы	Вентилятор	Компрессор	Турбина	Камера	Применение	Уровень
	NARIKA				Проектирование Характеристики	
2DFLOW, 3DFLOW		LAUNCH	S2GT, 2-3DEGT	AEROCAM	Проточная часть	
3DNSCR	3D-IMP-MULTI	3D-IMP-MULTI	3DNS-GT	3DNOXCAL	Анализ течений	
ANSYS, NASTRAN, PATRAN					Прочность	

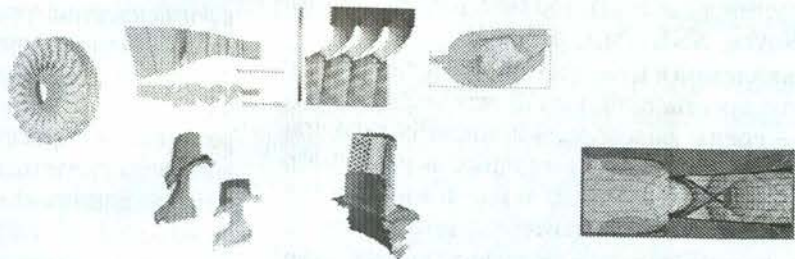
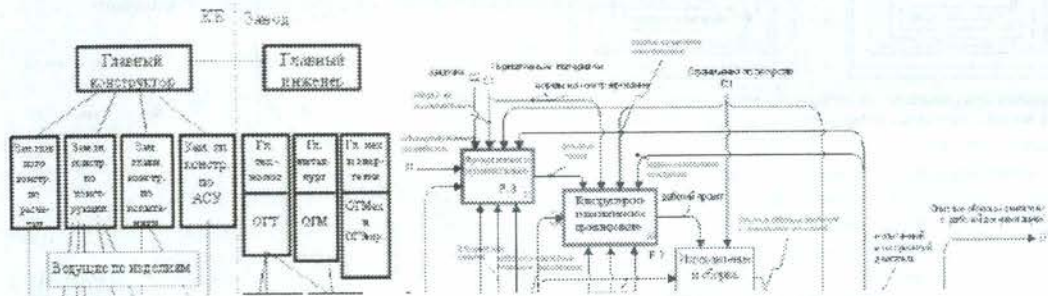
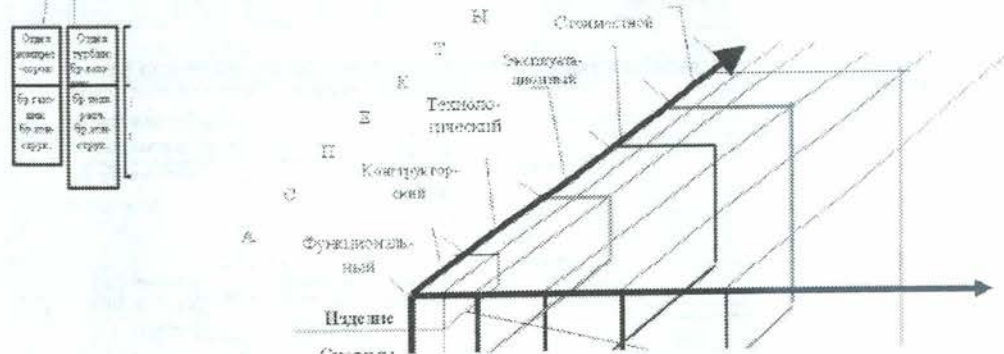


Рис. 2

Построение функциональных, информационных, динамических и структурных моделей процесса проектирования и производства ДЛА (для последующего реинжиниринга)



Детализация структуры семейства математических моделей СЭ, используемых в предложенной технологии



Построение функциональных, информационных, динамических и структурных моделей альтернативной организации процесса проектирования и производства ДЛА

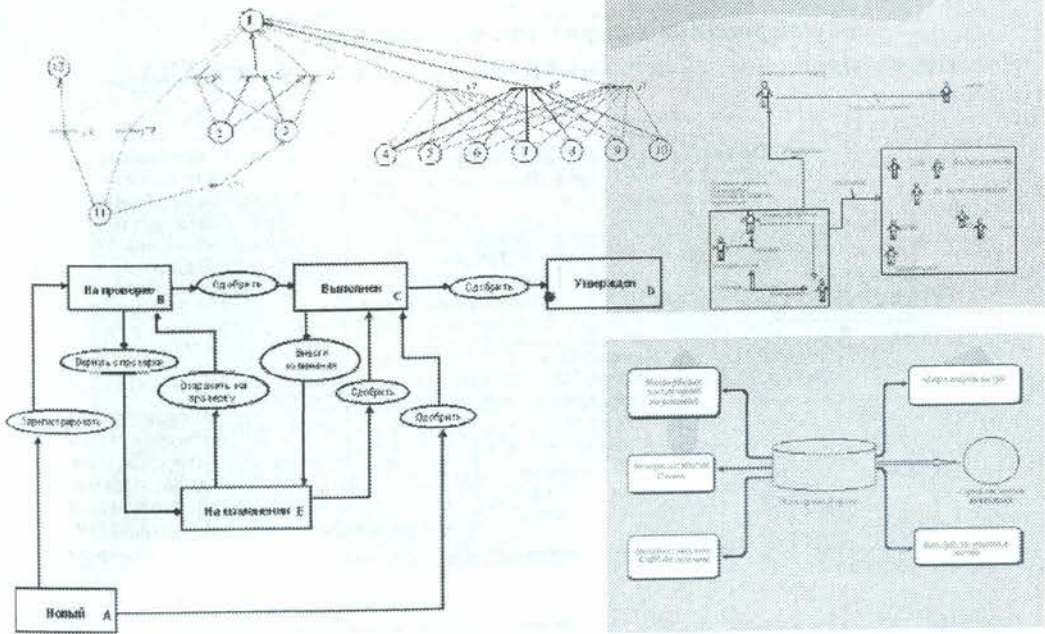
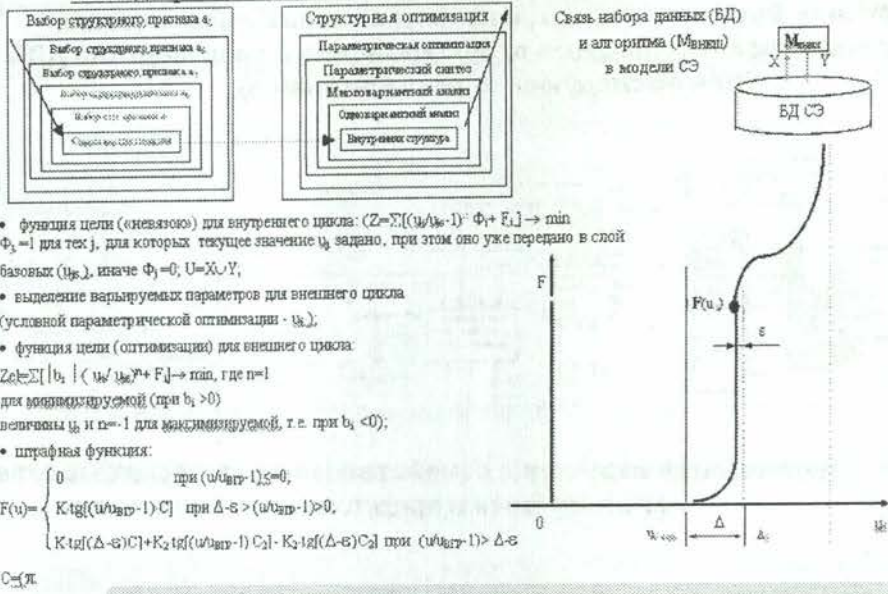
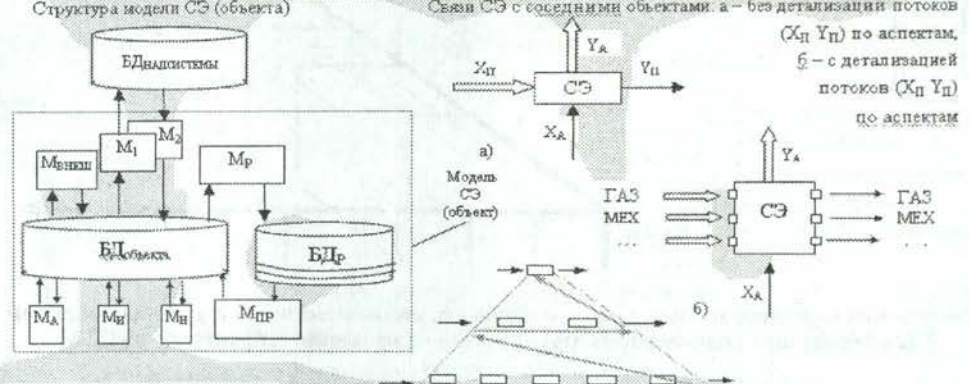


Рис. 3

Методы реализации обобщенных проектно-доводочных процедур



Алгоритмы в составе объектов, моделирующих СЭ и их информационные связи



Формирование алгоритмов выполнения обобщенных проектно-доводочных процедур при разработке ДЛА

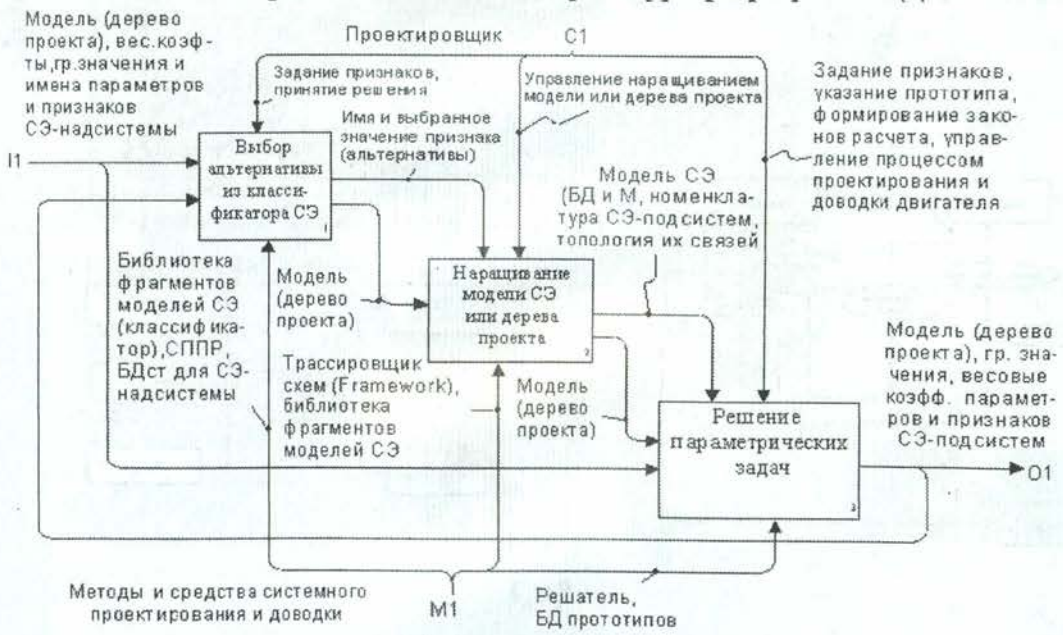


Рис. 4

Выявление последовательности принятия проектно-доводочных решений, динамического наращивания и наполнения данными (на основе объектного подхода) многоуровневого многоаспектного описания ДЛА

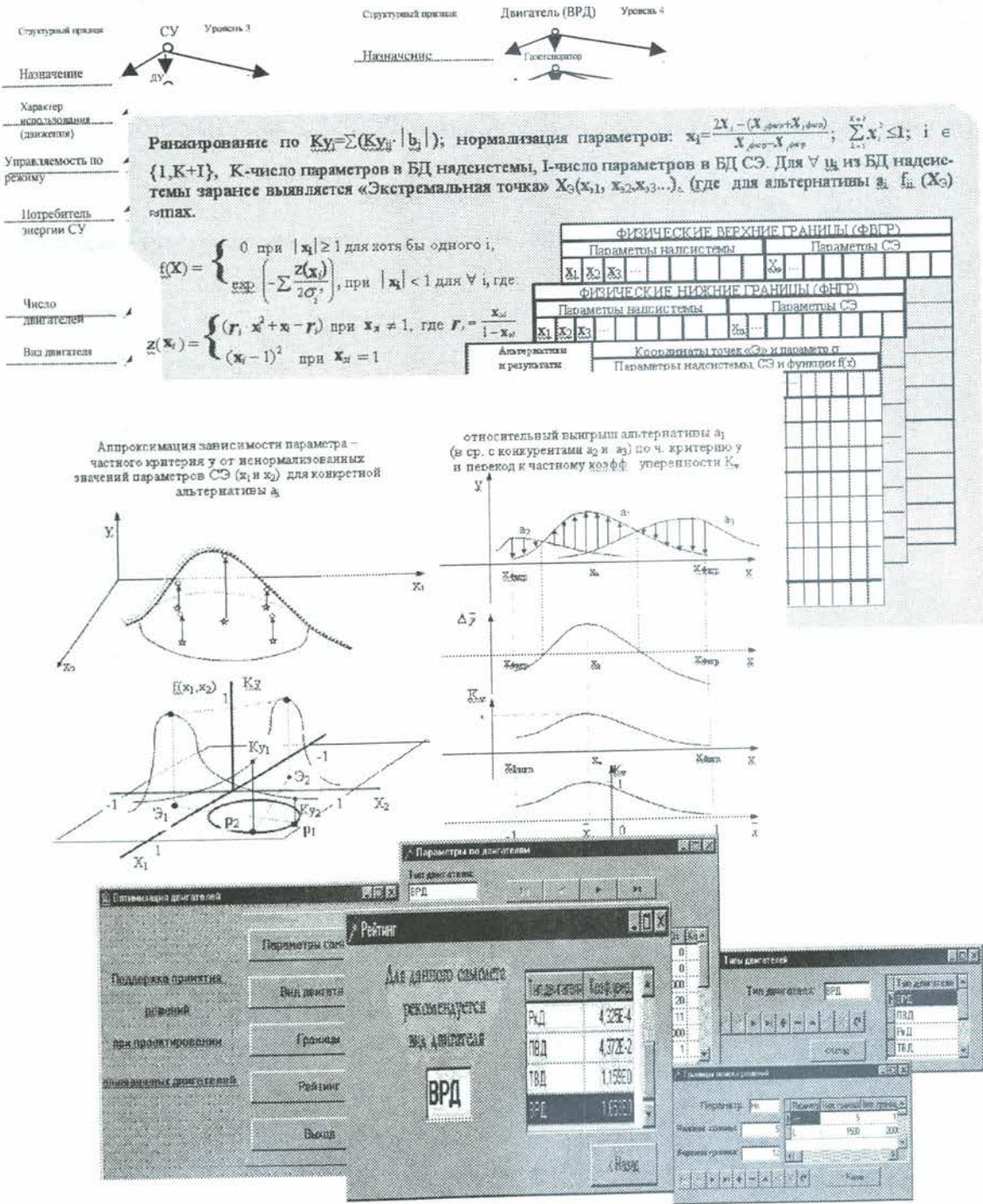
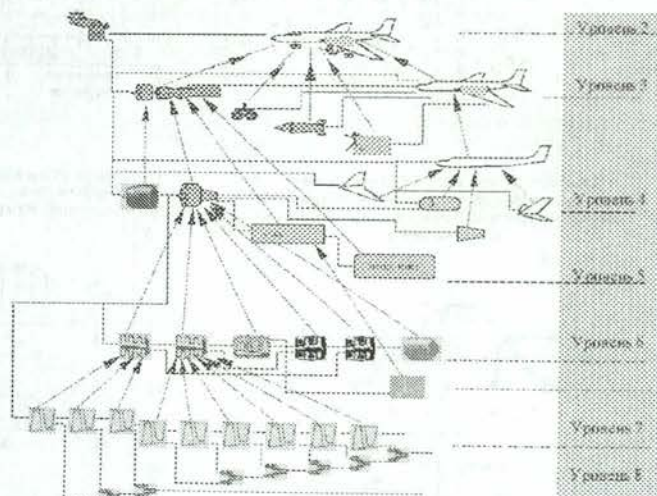


Рис. 5

Библиотеки ФЭ для функционального моделирования двигателей



Схема формирования многоуровневой имитационной сетевой модели



Автоматизация конструирования двигателей

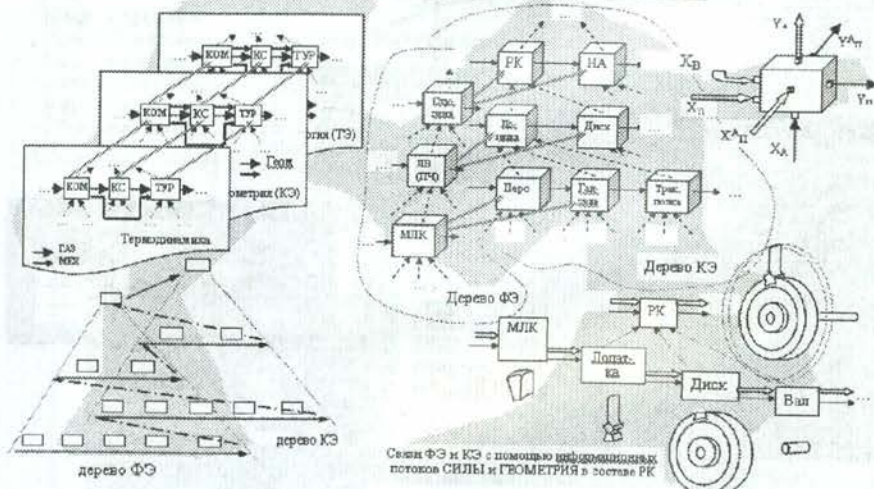


Рис. 6

формирование геометрической и силовой схемы двигателя

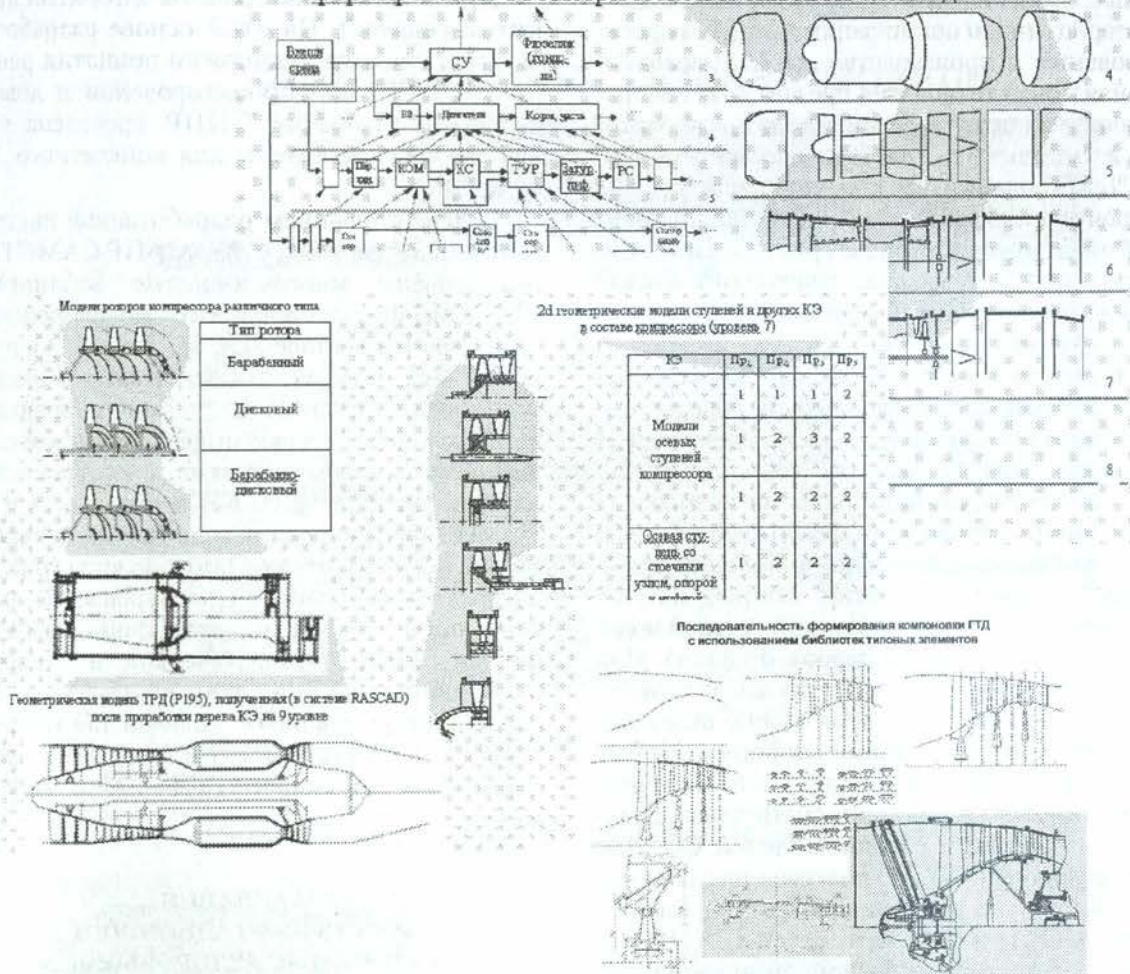


Рис. 7

PDM/SCADA/ ...). Для их согласованного использования развивается инициатива CALS (Continuous Acquisition and Life Cycle Support) «... стратегия последовательного преобразования существующего процесса в единый компьютеризированный и информационно-интегрированный процесс управления жизненным циклом систем военного назначения» (NATO CALS Handbook-2000), направленная на выработку стандартов для согласования информационного обмена ([1–5, 8, 9]). В частности для этого развивается стандарт STEP, но все это не решает проблемы создания информационной технологии для системной автоматизированной разработки ДЛА согласованно с моделью ЛА и другими системами в его составе.

ИССЛЕДОВАНИЯ ПО СОЗДАНИЮ НОВОЙ ИНФОРМАЦИОННОЙ ТЕХНОЛОГИИ

Опыт авторов по созданию и внедрению «Интегрированной типовой отраслевой САПР-Д АСПАД» (на принципах PDM, EIP и CAD/CAM) показывает, что при разработке всех подсистем должны соблюдаться определенные стандарты. Такие стандарты при создании системы АСПАД были предложены авторами, а их работоспособность продемонстрирована в авиамоторном ОКБ (на заводе им. В. Я. Климова, С.-Петербург).

В рамках данного проекта с использованием новых технологий и подходов авторы развивают эту концепцию и разрабатывают соответствующие методы и средства. Для этого ведется построение функциональных, информационных, динамических и структурных моделей процесса проектирования и производства ДЛА (для последующего реинжиниринга). Строятся функциональные, информаци-

онные, динамические и структурные модели альтернативной организации процесса проектирования и производства ДЛА. Разрабатываемая новая технология предполагает непрерывное развитие модели изделия в процессе его жизненного цикла. Процесс непрерывного формирования и развития модели изделия в процессе его ЖЦ иллюстрируется диаграммой предложенного вида (рис. 3). При этом существует оптимальная траектория движения и заполнения этой многомерной матрицы в конкретном процессе.

В основе новой технологии лежит сформированный универсальный алгоритм выполнения обобщенных проектно-доводочных процедур при разработке ДЛА. В настоящее время реализована одна из возможных схем унифицированного алгоритма реализации обобщенных проектно-доводочных процедур. Разработка изделия сопровождается формированием имитационной сетевой модели (развитие понятия дерева проекта). При этом используются иерархические библиотеки структурных элементов (СЭ), выделены их алгоритмы и типовые информационные связи. В соответствии с теорией шаблонов проектирования выделены специализированные алгоритмы в составе моделей СЭ. Для процессора (решателя) системы разработаны алгоритм и необходимая структура наборов данных (БД) в составе моделей СЭ. Это позволило сформировать схему организации системного автоматизированного проектирования и доводки двигателя. В схеме используется сетевая модель, которая формируется в виде дерева проекта с добавленными внутриуровневыми направленными связями (потоками). Показано, что формирование такой модели реализуется за счет циклического повторения универсальной процедуры, в которой чередуется решение параметрической и структурной задач (рис. 4).

Для развития новой технологии произведено выявление последовательности принятия проектно-доводочных решений, динамического наращивания и наполнения данными (на основе объектного подхода) многоуровневого многоаспектного описания ДЛА. Предложен оригинальный алгоритм принятия структурных проектных решений. Он опирается на накопление информации по ранее выполненным проектам и изделиям, в компактной форме хранимой в базах статистической информации (на плакате показана их структура). С учетом новых возможностей эту информацию могут корректировать Эксперты.

Предложена схема работы алгоритма принятия решений. На этой основе разработан вариант системы поддержки принятия решений (СППР) при проектировании и доводке ДЛА. Апробация СППР проведена при выборе вида двигателя для конкретного ЛА (рис. 5).

С использованием разработанной инструментальной системы (МетаСАПР САМСТО) реализованы многоуровневые библиотеки ФЭ для функционального моделирования двигателей в составе ЛА. Из этих ФЭ в процессе ЖЦ изделия, прежде всего на стадии разработки, формируется многоуровневая имитационная сетевая модель (в данном случае ЛА). В своем развитии многоуровневая имитационная модель КЭ используется и на этапах конструирования двигателя и технологической подготовки производства (рис. 6). Так, с использованием многоуровневой имитационной модели удается формализовать формирование геометрической и силовой схем двигателя. При этом используются базы параметризованных моделей КЭ (рис. 7). В работе отработана последовательность формирования компоновки ГТД (в 2d- и 3d-форматах).

РЕАЛИЗАЦИЯ СРЕДСТВ ИМИТАЦИОННОГО СЕТЕВОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ, САД/САМ/САМ/PDM-ПРИЛОЖЕНИЙ ДЛЯ ПОДДЕРЖКИ ПРОЕКТНО-ДОВОДОЧНЫХ ПРОЦЕДУР ПРИ РАЗРАБОТКЕ ДЛА

Программная реализация разработанной технологии выполнена в виде САД/САМ/САМ/PDM-приложений, универсальных управляющих программ — решателя и планировщика, алгоритмов выполнения обобщенных проектно-доводочных процедур при разработке ДЛА. Реализована среда для имитационного сетевого моделирования на основе базового набора ФЭ. В составе этой среды используется разработанная многоуровневая библиотека моделей ФЭ.

Произведена практическая отработка принципов выбора, динамического развития, контроля и управления точностью моделей. В частности, проведено моделирование работы двигателя АЛ-31ФП. Постпроцессор системы позволяет анализировать результаты в различном виде. В данном случае в виде характеристик (ВСХ двигателя, характеристики компрессоров и турбин). Для управления адекватностью моделей разработана ме-

Имитационная сетевая модель

EMIG 1.0 (с) Кафедра АД УГ АТ У В В 11.01 (установившийся режим)
 Файл Редактирование Расчеты Результаты Опции Справка

Модель - Grid

- Иерархия
 - Исходные условия
 - Входное устройство
 - Вход газа
 - Компрессор
 - Камера сгорания
 - Турбина газовая
 - Выходное устройство
 - Общие результаты

Детальный уровень

Доступные типы элементов

- Вход газа
- Выходное устройство
- Исходные условия
- Камера сгорания
- Общие результаты
- Редуктор
- Счетчик
- Турбина газовая
- Турбина газовая, свободная
- Форсажная камера
- Электрический генератор

Доступные результаты моделирования

- Вход газа
- Выходное устройство
- Вход газа
- Выходное устройство
- Исходные условия
- Камера сгорания

Базовый набор функциональных элементов

Идентификация характеристик двигателей и их СЭ

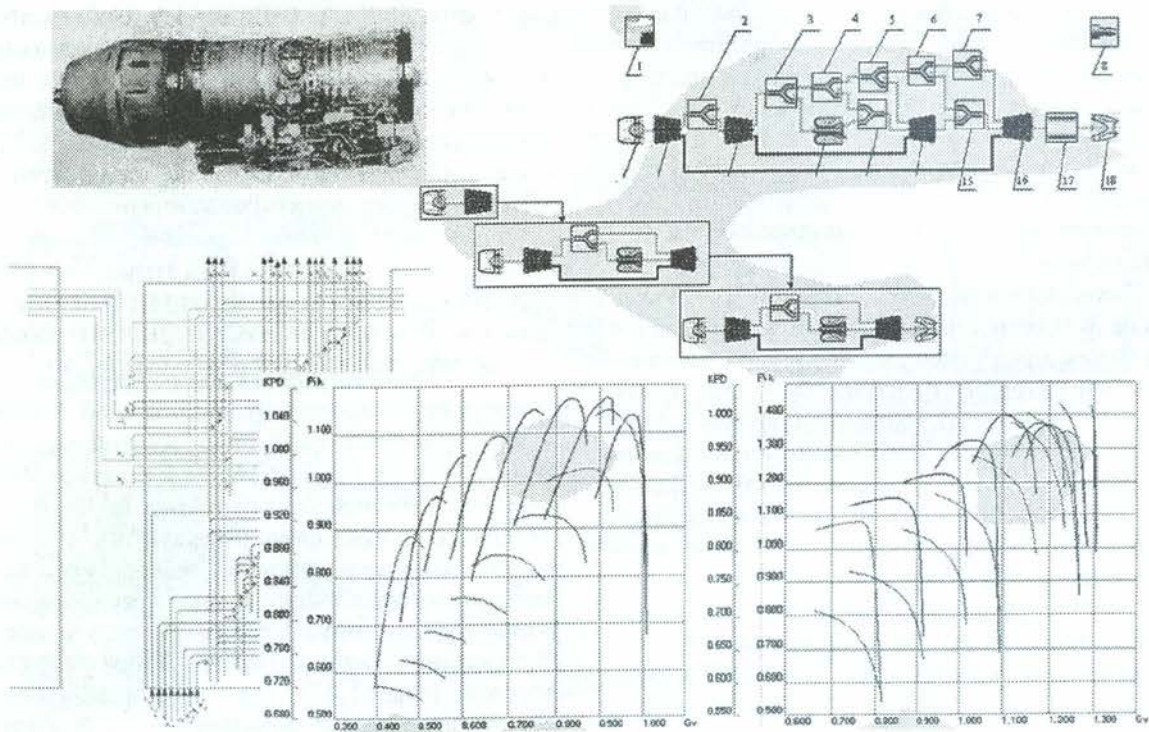


Рис. 8

Внутренняя структура ФЭ Двигатель (уровень 4)

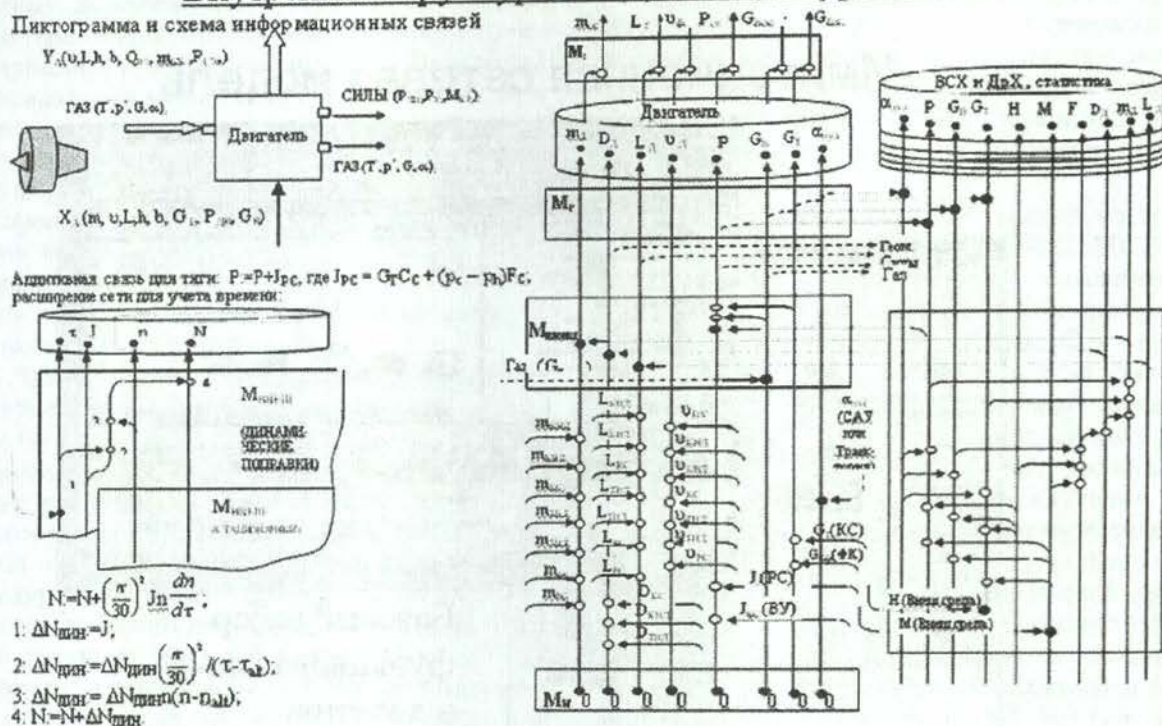


Рис. 9

тодика и средства идентификации характеристик двигателей и их СЭ с использованием имитационного сетевого моделирования (рис. 8). Универсальность подхода подтверждает пример моделирования ТКА 80/0.5 на базе РД-3М-500 и Р11(13)-300. Широту возможностей по формированию структур подтверждают результаты моделирования эжекторов и ТРДДсм с использованием ФЭ «Эжектор».

Технология развития моделей ФЭ в процессе ЖЦ изделия наглядно иллюстрируется на основе предложенного представления внутренней сетевой структуры ФЭ. Это позволяет сформировать соответствующую CASE-технологии. Оработка технологии такого развития моделей проведена путем добавления в модели ФЭ учета нестационарных факторов (рис. 9). Это позволило моделировать переходные процессы в различных двигателях. В частности, проведено моделирование переходных процессов в ряде двигателей и энергоустановок (АЛ-31Ф, ГТУ10/95 и др.).

Технология развития моделей проверена путем тестирования измененных моделей ФЭ на различных задачах. Например, проверка адекватности ФЭ «Камера сгорания» проводилась при переменных расходах рабочего тела, подаче топлива и объеме проточной ча-

сти (как это происходит в поршневых, пульсирующих ГТД и комбинированных двигателях). Дополнительно проверка адекватности ФЭ «Камера сгорания» проверялась при моделировании работы РДТТ и ЖРД. Газодинамическое моделирование камер сгорания ГТД также проведено с использованием сетевого имитационного моделирования (рис. 10).

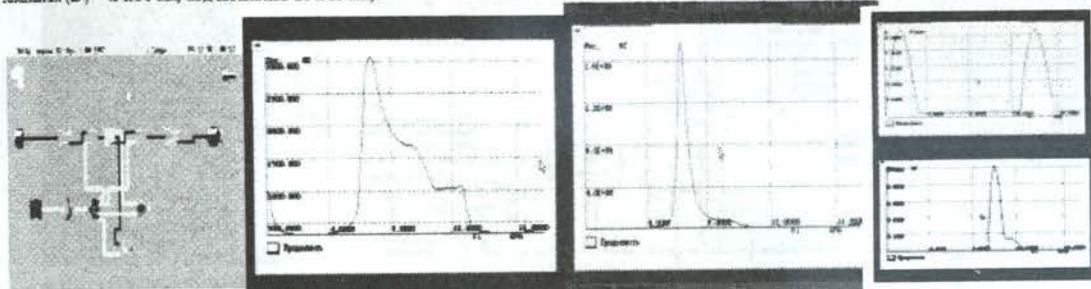
КОМПОНЕНТЫ И МЕТОДЫ ДЛЯ СОЗДАНИЯ КОМПЬЮТЕРНОЙ СРЕДЫ ДЛЯ СИСТЕМОГО АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ И ДОВОДКИ ДЛЯ

С использованием разработанной технологии проведена практическая отработка ряда САД/САМ/САЕ/PDM-приложений. Разработаны средства конструкторско-технологического проектирования лопаток (в том числе композиционных), конструкторско-технологического проектирования рабочих колес турбин, инженерного анализа и проектирования технологической оснастки для лопаток (рис. 11, 12), конструкторско-технологического проектирования внешней обвязки ГТД с использованием САД/САМ/САЕ-систем.

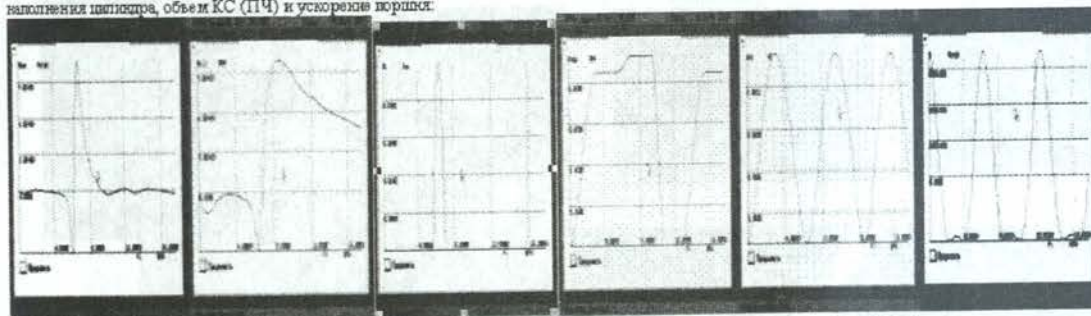
Разработаны общие принципы создания компьютерной САД/САМ/САЕ/PDM-среды для системного автоматизированного

Проверка ФЭ КС при переменных расходах, подаче топлива и объеме ПЧ

Камера сгорания 4-тактного дизеля (типа КамАЗ): $n=2800$ об/мин, $\varphi=18$, $V_d=1356$ см³, $q=0.129$ г/цикл, угол опережения подачи топлива $\alpha_{опр}=0.8$, время сгорания едноточечной капли $t_1=0.001$ с, время подготовки к воспламенению $t_2=0.001$ с, нач. температура в в.м.т. в конце выхлопа $T_{в.м.т.}=1000$ К, давление $p_{в.м.т.}=10650$ Па: датированы (по углу поворота КШМ, ред.) температуры (К) и давления (Па), расхода (кг/с) во всасывающем и выхлопном клапанах ($D_v=40$ и 50 мм, ход клапанов 20 и 25 мм).



механическая мощность (Вт, с учетом кинетической энергии поршня), средненитегральной мощности испарения, расход топлива, коэффициент наполнения цилиндра, объем и КС (ПЧ) и ускорение поршня.

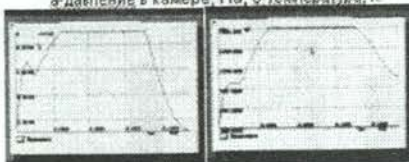


Проверка ФЭ КС при моделировании РДТТ

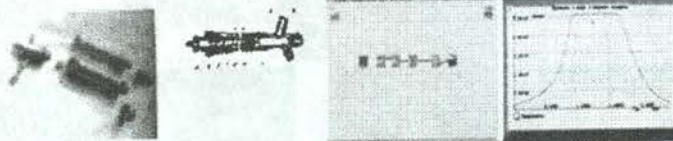
Экспериментальная камера РДТТ (М1-1) с разъемными воспламенителями: кривые давления и температуры в КС, площади поверхности горения



фотограммы работы РДТТ М1-5 с торцевым зарядом а- давление в камере, Па, б- температура, К



РДТТ (М1-5) с газорегулирующим устройством: поверхность горения, давление в КС



РДТТ М14-ГЖТ на стекле, заряд с золью и крышкой и «гордило» поршня – воспламенитель, рентгенограмма заряда, кривые давления в КС, тяги и координаты поршня (эксперимент и расчет)

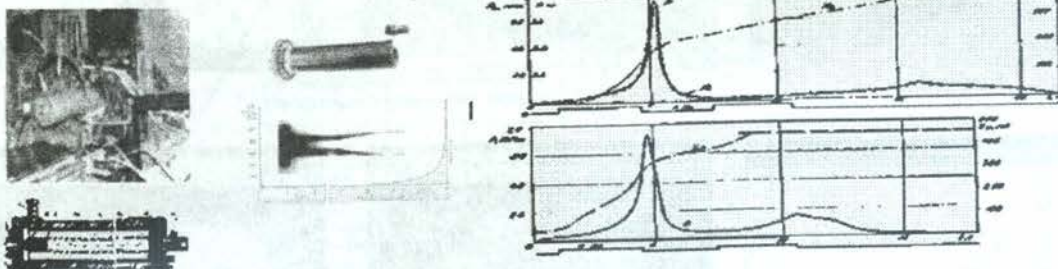


Рис. 10

Средства конструкторско-технологического проектирования лопаток с использованием CAD/CAM/CAE-систем

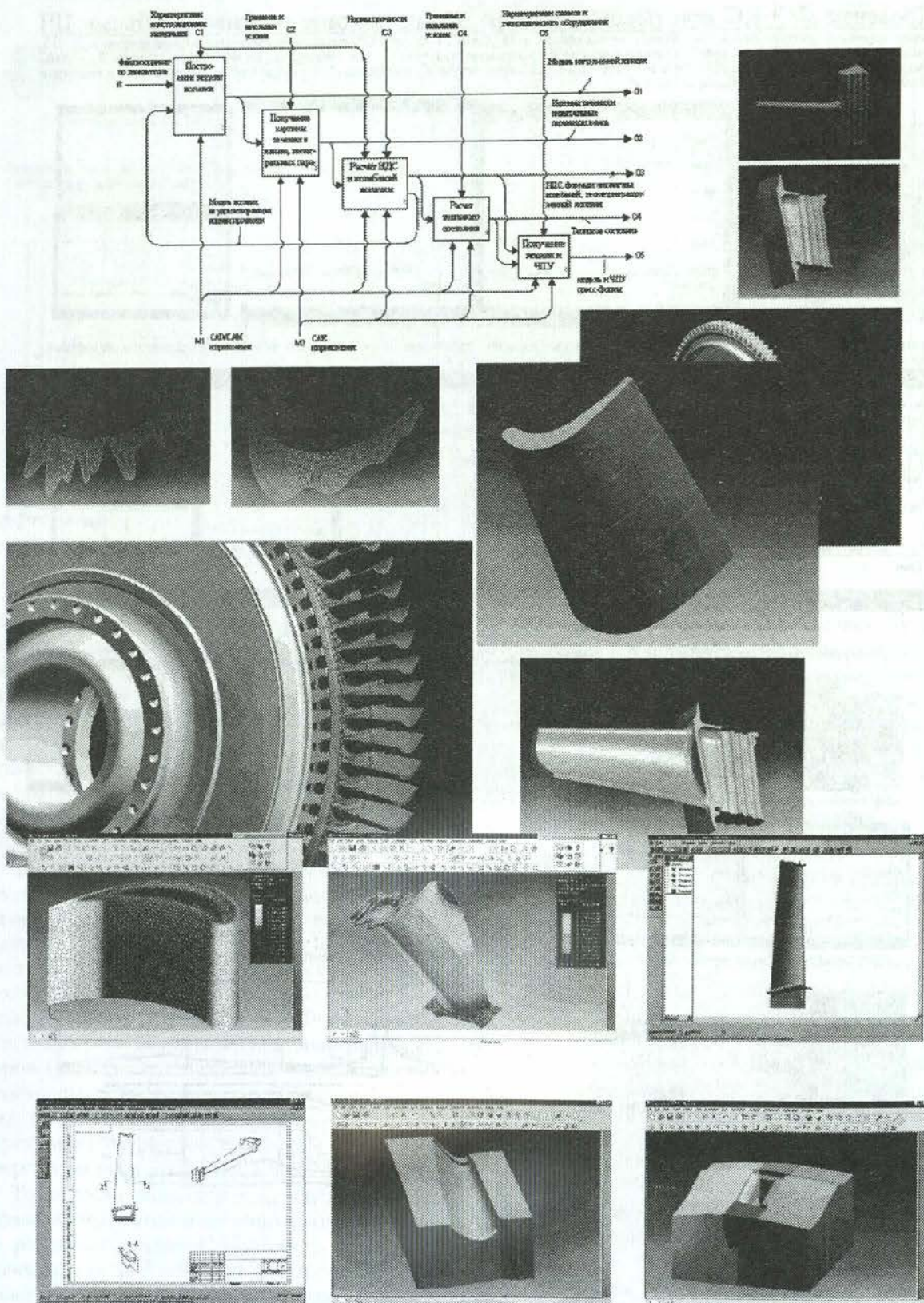


Рис. 11

Функциональная IDEF0-диаграмма разработки композиционной лопатки

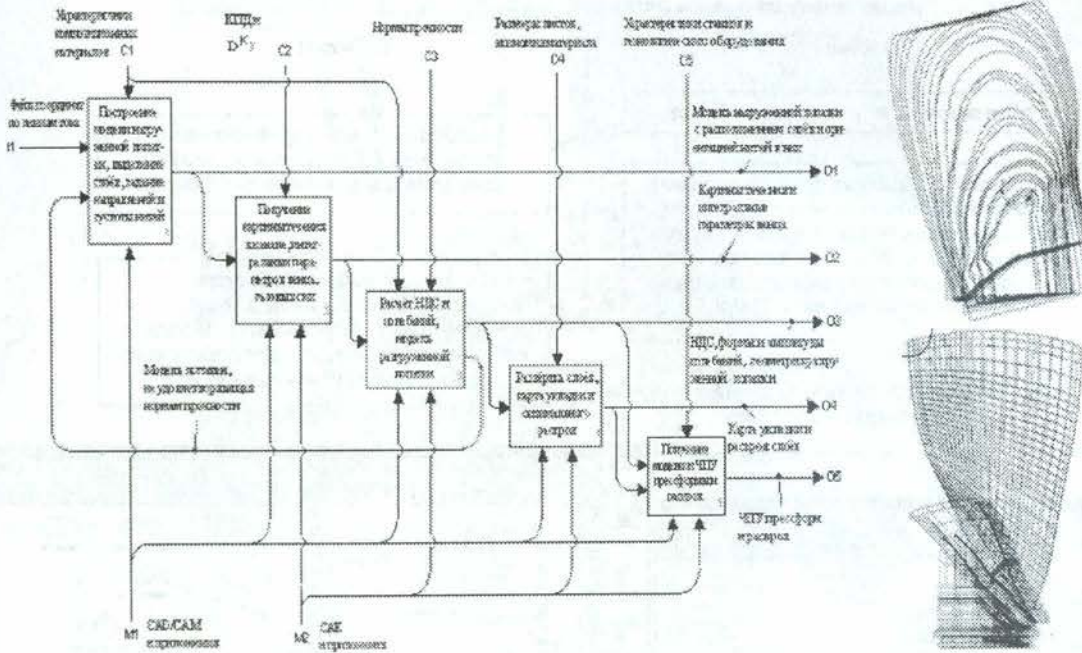


Рис. 12

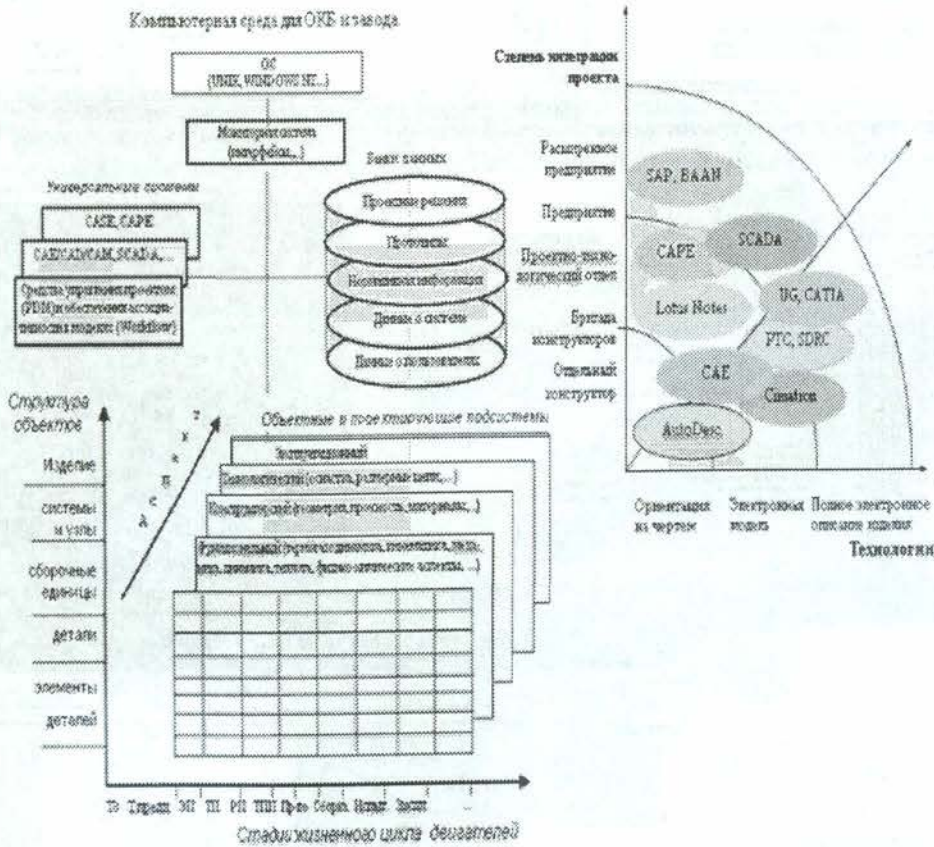


Рис. 13

Интеграция имитационного сетевого моделирования с CAD/CAE и PDM

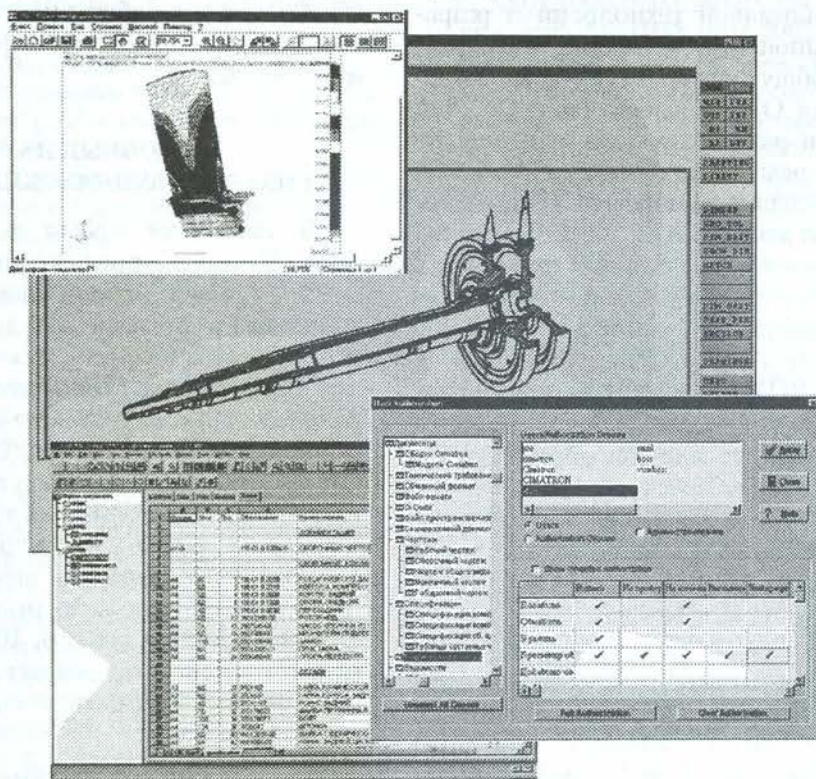


Рис. 15

Официальная регистрация разработанных компонентов системы



Рис. 16

проектирования и доводки ДЛА с использованием разработанной технологии и разработанных компонентов. Они включают разработанную общую архитектуру компьютерной среды для ОКБ и завода (рис. 13). Для ее реализации ранее разработанная инструментальная среда (MetaСАПР САМСТО) развивается с использованием RUP-технологии (рис. 14) и языка UML (система Rational Rose). Это позволяет поэтапно отрабатывать принципы многоуровневого многоаспектного моделирования, производить интеграцию имитационного сетевого моделирования с САД/САЕ и PDM и разработанными на их основе приложениями (рис. 15).

К настоящему времени разработанные методы и средства апробированы:

- при создании и внедрении «Интегрированной САПР АСПАД» и ее компонентов (в ФГУП «Завод им. В. Я. Климova» и НПО «Сатурн», ММПП «Салют»);
- при развитии и расширении области применения программного комплекса термодинамического моделирования двигателей DVIG и MetaСАПР (Framework) САМСТО (в ФГУП «Завод им. В. Я. Климova», НПО «Сатурн», ОАО СНТК им. Н. Д. Кузнецова, ФГУП «НПП «Мотор»);
- при создании и внедрении САД/САМ-технологии разработки вентиляторных лопаток из листовых композиционных материалов (в ФГУП «НПП «Мотор»);
- при разработке базы конструкторской информации по авиадвигателям в среде параллельного проектирования (с использованием PDM) (для ММПП «Салют», УМПО, ФГУП «Завод им. В. Я. Климova» и учебного процесса УГАТУ);
- в работе ФГУП «НПП «Мотор» при доводке газотурбинной энергоустановки ГТЭУ 10/95;
- в учебном процессе по специальностям «Авиационные двигатели», «Авиа- и ракетостроение» и «Теплоэнергетика» в УГАТУ, СГАУ, КГТУ, МАИ;
- в Энергомап-корпорации (С.-Петербург) при автоматизированном проектировании энергоустановок.

Разработанные компоненты системы официально зарегистрированы (рис. 16). За период 2003–2004 гг. опубликованы: 1 монография ([21]), 3 учебных пособия (+ 1 в стадии издания), издано приложение к журналу «Информационные технологии» [6] (и еще одно находится в печати), 20 статей (в рецензируемых изданиях). В работе участвуют 3 док-

торанта (Д. Г. Кожин, Д. А. Ахмедзянов, И. М. Горюнов, работы подготовлены к защите), 6 аспирантов, 6 магистрантов, бакалавры и студенты.

ОСНОВНЫЕ НАУЧНЫЕ И НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

В настоящее время в НИЛ САПР-Д УГАТУ разработаны компоненты компьютерной среды, обеспечивающей системную (в рамках надсистемы – ЛА, другого транспортного средства, энергетической или технологической установки) автоматизированную разработку двигателей (ракетных, авиационных) с использованием САД/САМ/САЕ/PDM-систем, при которой структура и содержание многоуровневой и многоаспектной модели ДЛА (дерево проекта) на основе объектного подхода динамически формируется в процессе оптимального проектирования, изготовления и доводки [6, 10–20]. Исследования и практическая работа в этом направлении продолжают.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Имитационное моделирование производственных систем / Под ред. А. А. Вавилова М.: Машиностроение, Берлин: Техника, 1983. 416 с.
2. Советов Б. Я., Яковлев С. А. Моделирование систем. М.: Высш. шк., 2001. 343 с.
3. Колчин А. Ф., Овсянников М. В., Стрекалов А. Ф., Сумароков С. В. Управление жизненным циклом продукции. М.: Анахарсис, 2002. 304 с.
4. Норенков И. П. Основы автоматизированного проектирования: Учеб. для вузов. М.: МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2002. 336 с.
5. Норенков И. П., Кузьмик П. К. Информационная поддержка наукоемких изделий. CALS-технологии. М.: МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2002. 320 с.
6. Кривошеев И. А., Яруллин Т. Р., Сапожников А. В. Методы и средства для внедрения компонентов CALS-технологии в авиадвигателестроении // Приложение к журналу «Информационные технологии». М.: Новые технологии, 2004. № 3. 32 с.
7. Тунаков А. П., Голланд А. Б., Мац Э. В., Морозов С. А. Программный комплекс ГРАД для расчета газотурбинных двигателей // Изв. вузов. Авиационная техника. 1985. № 1. С. 83–85.
8. Чуян Р. К. Методы математического моделирования двигателей летательных аппаратов. М.: Машиностроение, 1988. 288 с.
9. Неруш Ю. М. Логистика: Учеб. для вузов. М.: ЮНИТИ-ДАНА, 2003. 495 с.

10. Проектирование авиационных газотурбинных двигателей / Под ред. А. М. Ахмедзянова. М.: Машиностроение, 2000. 454 с.
11. Ахмедзянов Д. А., Горюнов И. М., Кривошеев И. А. Термогазодинамический анализ рабочих процессов ГТД в компьютерной среде DVIGw. Уфа: УГАТУ, 2003. 162 с.
12. Кривошеев И. А., Ахмедзянов Д. А. Автоматизация системного проектирования авиационных двигателей. Уфа: УГАТУ, 2002. 61 с.
13. Кривошеев И. А. Автоматизация системного проектирования авиационных двигателей: Автореф. дис. ... д-ра техн. наук. Уфа, 2000. 32 с.
14. Кривошеев И. А. САПР авиационных двигателей: состояние и перспективы // Информационные технологии. М.: Машиностроение, 2000. № 1. С. 8–15.
15. Кривошеев И. А. Создание информационного фонда для организации системного проектирования авиадвигателей // Вестник УГАТУ. 2002. № 1. С. 193–201.
16. Яруллин Т. Р., Ахмедзянов А. М. Электронные информационные архивы в структуре систем автоматизированного проектирования авиационных двигателей // Изв. вузов. Авиационная техника. 1998. № 1. С. 111–118.
17. Кривошеев И. А., Каганов А. М., Яруллин Т. Р. Использование SADT и CAD/CAM-технологий при разработке авиационных ГТД // Информационные технологии. М.: Машиностроение, 1998. № 5. С. 2–8.
18. Кривошеев И. А., Сапожников А. Ю., Карпов А. В. Применение САД-систем для автоматизации компоновки авиационных газотурбинных двигателей // Системы проектирования, технологической подготовки производства и управления этапами жизненного цикла промышленного продукта (CAD/CAM/PDM-2002): Тез. докл. междунар. конф. М.: ИПУ РАН, 2002. С. 73–74.
19. Кривошеев И. А., Карпов А. В., Козакевич С. С. Реинжиниринг подготовки специалистов по авиационным двигателям с использованием CALS-технологии // Доклады междунар. НТК памяти ген. констр. акад. Н. Д. Кузнецова. Самара: СГАУ, 2002. Ч. 3. С. 67–74.
20. Кривошеев И. А., Воронков А. П., Карпов А. В. Использование CAD/CAM и PDM-технологии при проектировании и доводке авиационных ГТД // Системы проектирования, технологической подготовки производства и управления этапами жизненного цикла промышленного продукта (CAD/CAM/PDM-2001): Матер. 1-й Междунар. конф. и выставки. М.: ИПУ РАН, 2001. <http://lab18.ipu.rssi.ru/labconf/article.asp?num=52>.
21. Кривошеев И. А., Ахмедзянов Д. А. Моделирование динамических процессов в сложных системах / Уфимск. гос. авиац. техн. ун-т. Уфа, 2003. 99 с.

ОБ АВТОРЕ



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.