

**А. Ю. Сапожников, И. А. Кривошеев, В. А. Зрелов,
М. Е. Проданов, А. Ю. Цой, А. С. Миронов**

ПРИМЕНЕНИЕ СИСТЕМЫ ПОДДЕРЖКИ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ ДЛЯ ВЫБОРА КОНСТРУКТИВНО-СИЛОВОЙ СХЕМЫ АВИАЦИОННОГО ГТД НА ЭТАПЕ ЭСКИЗНОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ

Представлен метод выбора расположения опор турбокомпрессора ГТД на этапе эскизного проектирования с применением системы поддержки принятия решения. Формализация выполнена на основе методологии SADT, рассмотрены программные компоненты информационной среды и взаимодействие между ними. *Автоматизация; проектирование; схема расположения опор; конструктивно-силовая схема ГТД*

В настоящее время CALS-технологии приобретают все большее значение в процессе проектирования авиационных ГТД. В жизненном цикле двигателя эскизное проектирование (ЭП) является одним из наиболее важных этапов, так как результаты принятых на этом этапе решений определяют 70% стоимости всего проекта [1]. Построение IDEF0-модели на основе методологии SADT [2, 3] позволяет формализовать последовательность работ, проводимых при проектировании ГТД, проводить анализ «узких» мест, осуществлять последующий реинжиниринг процесса.

ФОРМАЛИЗАЦИЯ РАБОТ НА ЭТАПЕ ЭСКИЗНОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ

В жизненном цикле ГТД этапу ЭП предшествует стадия «Исследование и обоснование разработки». На рис. 1 показан состав работ, составляющих эту стадию. Результатом их выполнения являются сведения по прогнозу развития двигателей конкретного назначения, по уровню требуемых параметров и показателей, по особенностям схем двигателей и отдельных узлов и систем, по возможностям разработки базового газогенератора (ГГ), пригодного для использования в перспективных двигателях другого назначения, по дальнейшему развитию и модернизации двигателей для улучшения их параметров [4]. Эти данные являются исходными для этапа ЭП при создании новых ГТД.

Декомпозиция этапа эскизного проектирования по методологии SADT приведена на рис. 2. К задачам, не формализованным на данном этапе, относится задача выбора конструктивно-силовой схемы двигателя (рис. 3, блок A2131). Актуальность решения данной задачи

состоит в устранении разрыва между функциональным проектированием и автоматизированным переходом к конструкторской деятельности в интегрированной программной среде, оптимизации выбранных решений с учетом многообразия возможных вариантов и противоречивости требований, предъявляемых к авиационным двигателям. На рис. 3 видно, что в состав интегрированной программной среды входят: интеллектуальная компонента – система поддержки принятия решений (СППР), построенная на основе универсальной «пустой» экспертной системы (оболочки), универсальные CAD/CAE-системы, программные средства MS Office, а также PDM-система, обеспечивающая коллективную работу персонала в едином информационном пространстве.

ВЫБОР КОНСТРУКТИВНО-СИЛОВОЙ СХЕМЫ ГТД

Предлагаемый алгоритм выбора конструктивно-силовой схемы (КСС) двигателя позволяет проектировщику, используя возможности СППР и PDM-системы, выполнять следующие действия: формировать возможные варианты конструктивно-силовых схем расположения опор (КССРО) двигателей, отбирать наиболее подходящие схемы среди сформированных, оценивать преимущества и недостатки отобранных схем и выбирать из них наиболее подходящую для проектируемого двигателя, составлять перечень всех реализованных двигателей, имеющих выбранную схему, выбирать прототип, рассчитывать линейные размеры расположения опор и, как результат, формировать КСС двигателя с уточненным количеством и расположением опор.

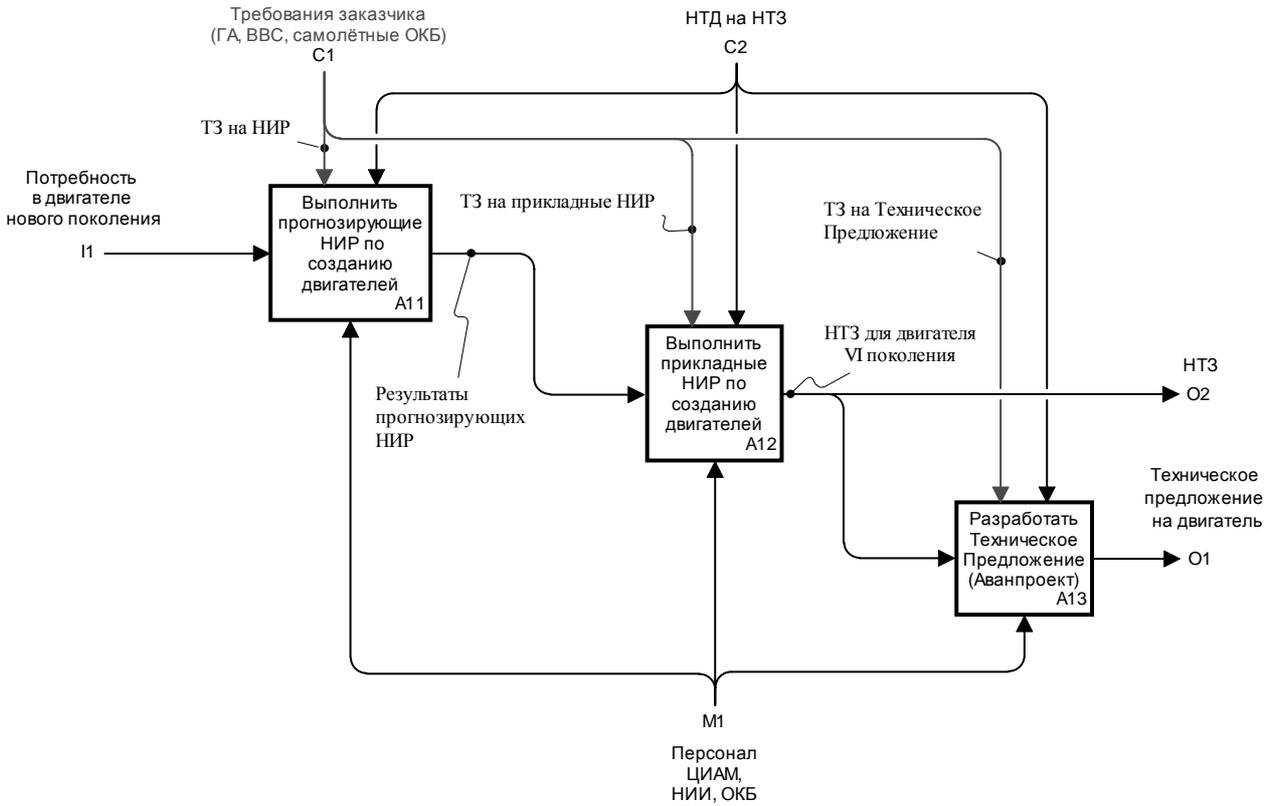


Рис. 1. Декомпозиция блока «Исследование и обоснование разработки» в составе работ стадии технического предложения

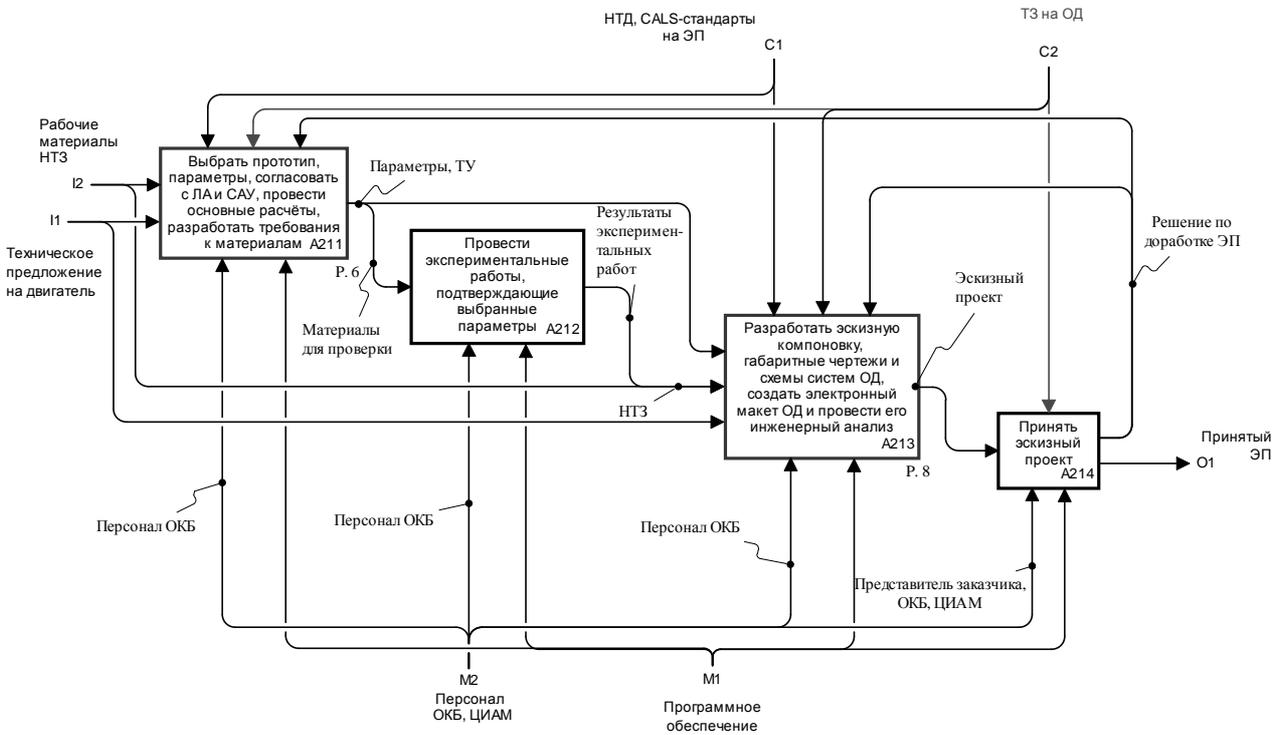


Рис. 2. Декомпозиция блока «Разработать эскизный проект»

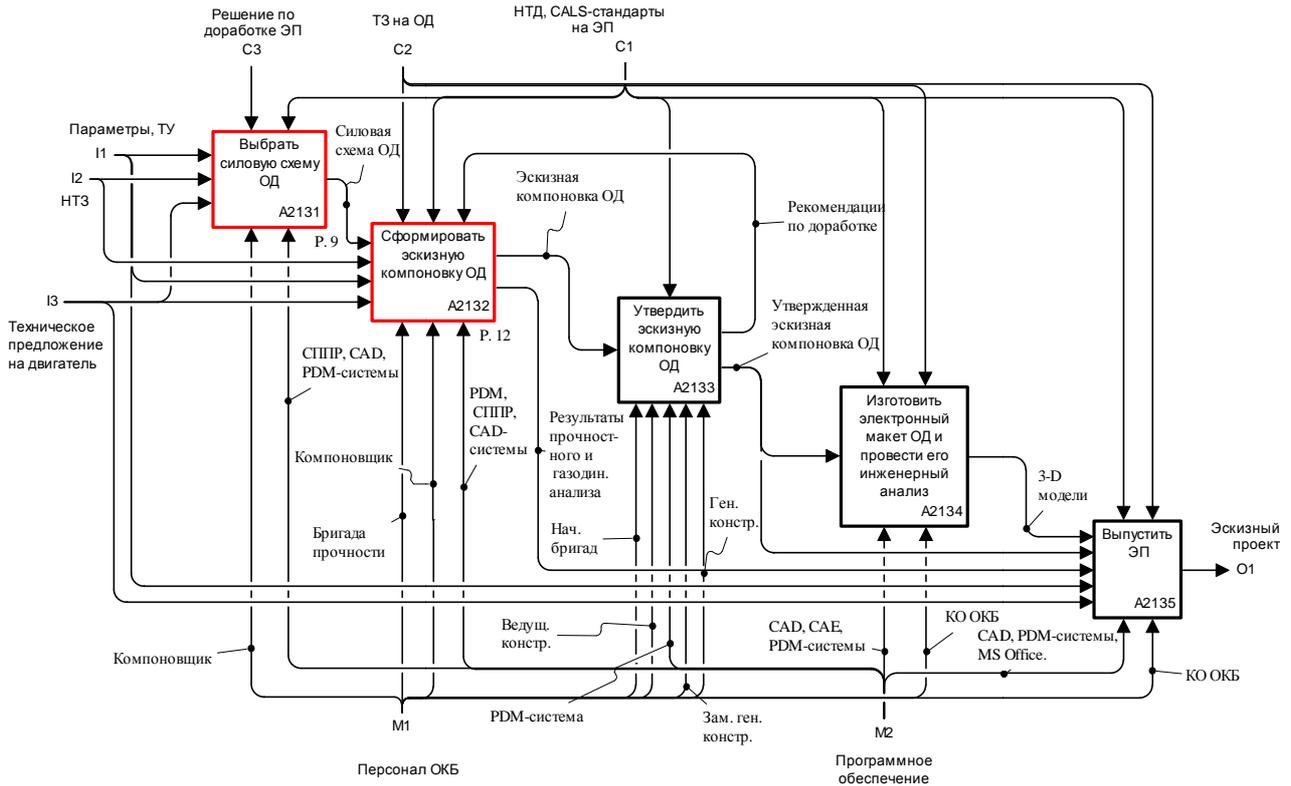


Рис. 3. Декомпозиция блока «Разработать эскизную компоновку»

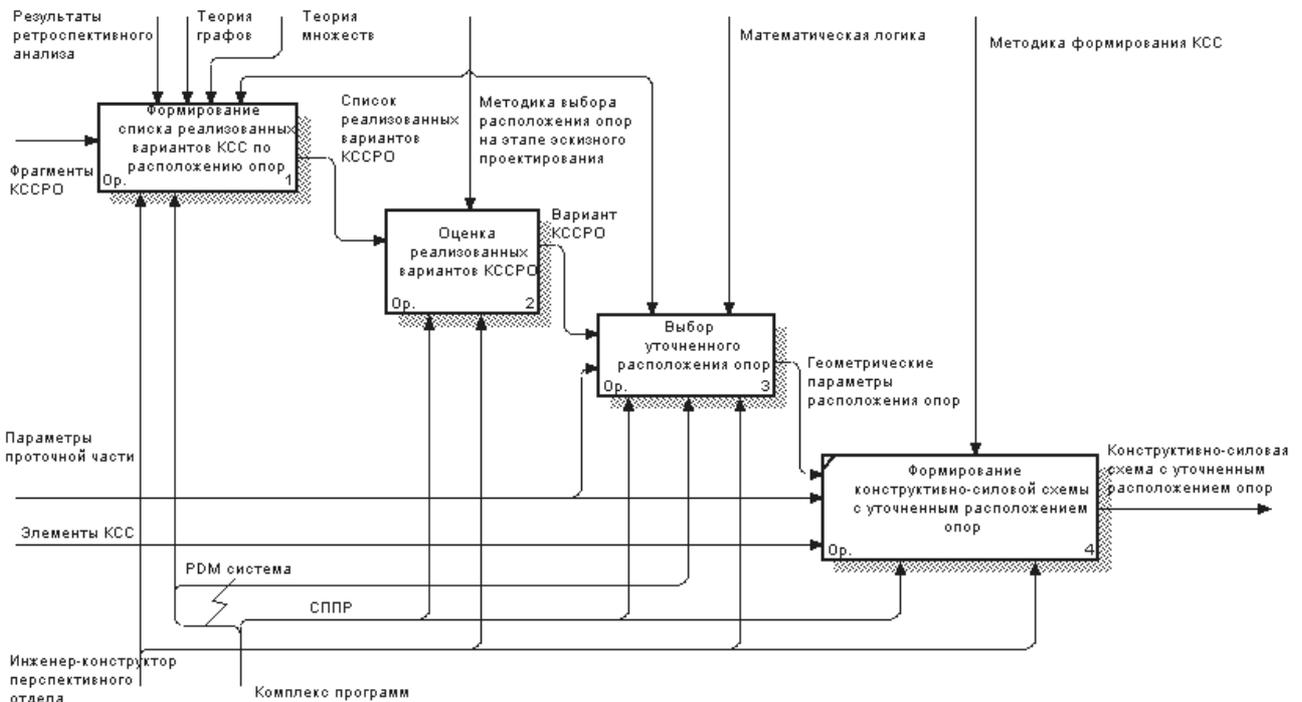


Рис. 4. Декомпозиция блока «Выбор силовой схемы ОД»

Декомпозиция блока «Выбрать силовую схему ОД» (рис. 3, блок A2131) показана на IDEF0-диаграмме на рис. 4. На данном этапе силовая схема ГТД может быть визуализирована с применением условно стилизованных элементов (рис. 5).

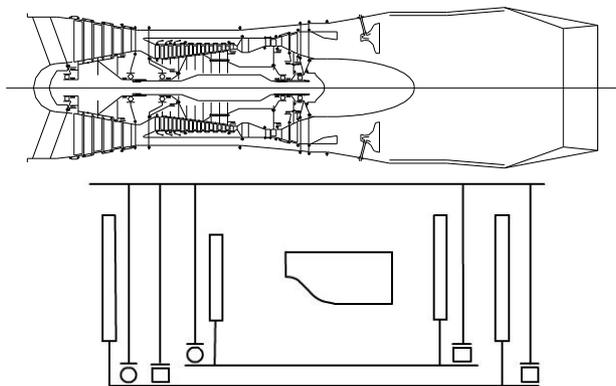


Рис. 5. Один из вариантов силовой схемы авиационного ГТД (ТРДДФсм) и ее условно-стилизованное представление

Работа данных модулей с точки зрения взаимодействия комплекса программ и проектировщика происходит следующим образом.

Первоначально в PDM-системе формируется список возможных конструктивно-силовых схем двигателя, описывающих количество и расположение опор (рис. 6). При этом крите-

риями отбора схем из всей области возможных вариантов являются количество роторов, заданная схема силового замыкания или схема турбокомпрессора (ТК) базового ГТ.

На следующем шаге выбранное множество схем в заранее закодированном виде (например, как указано в [5]) передается в СППР для экспертной оценки выбранных вариантов. При работе с СППР проектировщику необходимо выбрать из списка критериев (заложенных в СППР) те, которые заданы в ТЗ и которые необходимо учесть при оценке той или иной конструктивно-силовой схемы. Указанные параметры могут быть введены в ручном режиме или выбраны из файла, сформированного PDM-системой.

После формирования списка оценочных параметров конструктору необходимо по каждому параметру сравнить все варианты схем и отметить варианты, которые принимаются по данному параметру (рис. 7).

После завершения процедуры оценки реализованных вариантов программа подсчитывает количество пометок для каждого варианта и выдает вариант с наибольшим количеством преимуществ (табл. 1).

После оценки вариантов КССРО их количество уменьшается до одного выбранного варианта.

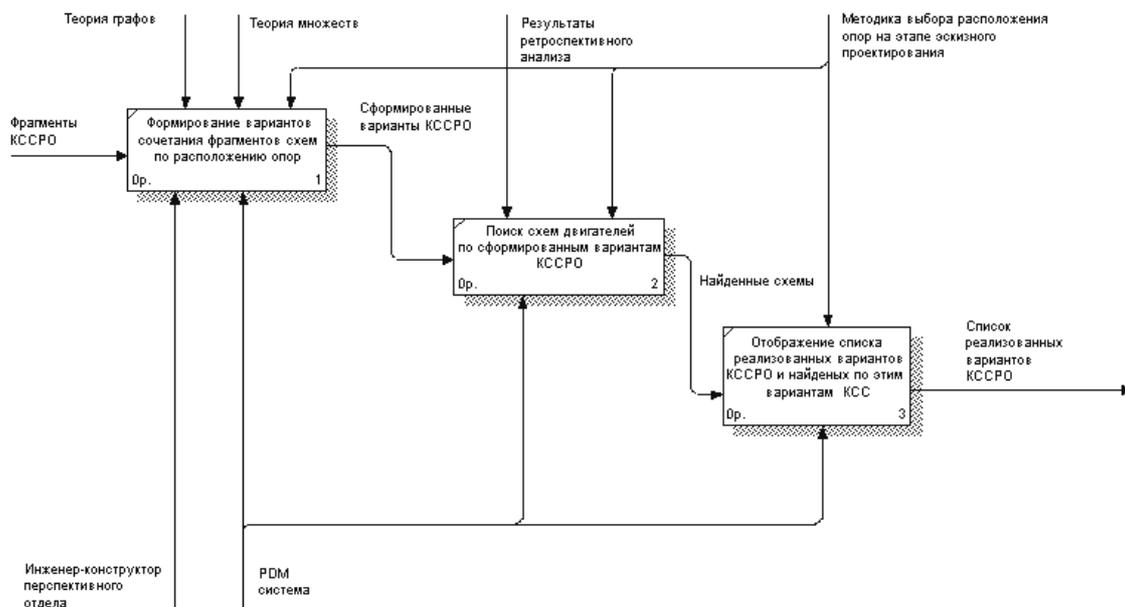


Рис. 6. Декомпозиция блока «Формирование списка реализованных вариантов КСС по расположению опор»

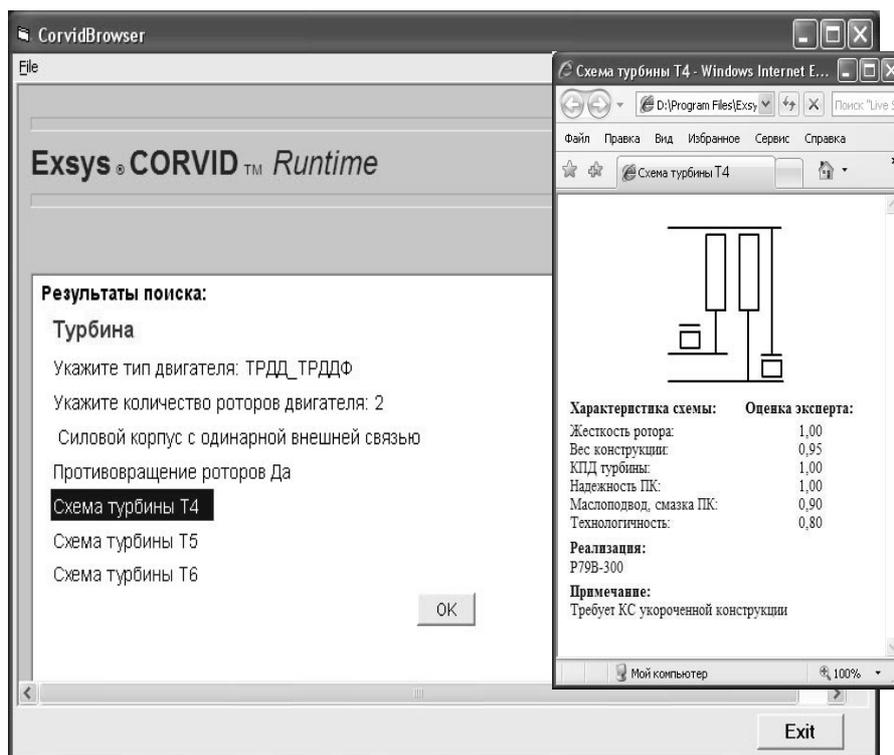


Рис. 7. Окно просмотра результатов в СППР

Таблица 1
Результаты работы СППР

Код схемы	Критерии оценки КСС				Инте- граль- ный показа- тель	Реали- зация
	Смазка опор ком- прессо- ра	Смазка опор турби- ны	...	КПД турби- ны		
A ₁	0,9	0,7	...	0,9	7, 9	ПС-90
A ₂	0,8	0,6	...	0,8	7,8	нет
...
A _i	0,8	0,5	...	0,8	7,1	EJ200

Далее для выполнения этапа «Выбор уточненного расположения опор» необходимо совершить следующие действия:

1) Рассчитать относительные линейные коэффициенты найденных схем двигателей по алгоритму [6], значения которых будут являться критериями выбора места расположения опор:

• $\bar{L}_K = \frac{L_K}{L_{TK}}$ – относительная длина компрессора;

• $\bar{L}_T = \frac{L_T}{L_{TK}}$ – относительная длина турбины;

• $\bar{L}_{ОПК} = \frac{L_{ОПК}}{L_{TK}}$ – относительное расстояние от опоры до входа в компрессор;

• $\bar{L}_{ОТК} = \frac{L_{ОТК}}{L_{TK}}$ – относительное расстояние между опорами ТК.

На данном этапе СППР делает запрос в PDM-систему и получает необходимые данные по найденным двигателям для расчета их относительных линейных коэффициентов.

2) Рассчитать относительную длину компрессора и турбины проектируемого двигателя. Для расчета относительных длин инженеру необходимо указать системе поддержки принятия решения месторасположение файла (например, txt или xls) с результатами термогазодинамического расчета двигателя, из которого СППР в автоматическом режиме выберет необходимые ей данные.

3) Сравнить относительные длины проектируемого двигателя с относительными длинами двигателей, имеющих выбранную схему расположения опор. Этот этап выполняется программой автоматически. Для работы она использует схемы двигателей, найденные при выполнении этапа поиска реализованных схем расположения опор [7]. После сравнения относительных длин на мониторе отображается спи-

сок двигателей, имеющих наиболее близкие значения относительных длин, в порядке удаления от значений относительных длин проектируемого двигателя.

Затем из появившегося списка двигателей проектировщику предлагается выбрать двигатель в качестве прототипа. После чего программа рассчитывает геометрические параметры расположения опор в проектируемом турбокомпрессоре, используя относительные коэффициенты двигателя-прототипа.

Декомпозиция блока «Выбор уточненного расположения опор» отображена на рис. 8.

После сбора необходимых данных: результатов термодинамического расчета и линейных размеров расположения опор, программа приступает к построению конструктивно-силовой схемы проектируемого двигателя.

После завершения работы данного алгоритма можно переходить к компоновке двигателя с применением CAD-систем, куда передаются геометрические параметры расположения опор, полученные в СППР.

ОРГАНИЗАЦИЯ КОЛЛЕКТИВНОЙ РАБОТЫ

Параллельное выполнение работ (рис. 9) в едином информационном пространстве (ЕИП) между всеми участниками жизненного цикла изделия реализуется с помощью информацион-

ных систем специального класса – систем управления данными об изделии (PDM-систем).

Главная задача PDM-системы заключается в предоставлении необходимой информации каждому участнику процесса в нужное время и в удобной для него форме.

Объектно-ориентированная модель данных (в дальнейшем PDM-модель), показанная на рис. 10, имеет ряд свойств, позволяющих обеспечить развитие данного проекта при удобной работе в многопользовательском режиме, и реализует следующие возможности:

- добавление новых описаний на любом уровне иерархического дерева объекта (добавление новых сборочных единиц (СЕ) и деталей (Д));
- обеспечение доступа каждого пользователя только к той информации, которая предоставляется ему для работы;
- вызов рабочих процедур расчета и проектирования по описанию хранимого файла для любого элемента дерева объекта.

Предложенная структура базы данных (БД) PDM-системы содержит описания данных о ГТД в виде иерархических деревьев в основном классе «ПРОЕКТЫ». Это описание может быть выполнено с любой степенью подробности и с любой точки зрения. Иерархические деревья отражают наследуемые иерархические связи между любыми типами информации в БД.

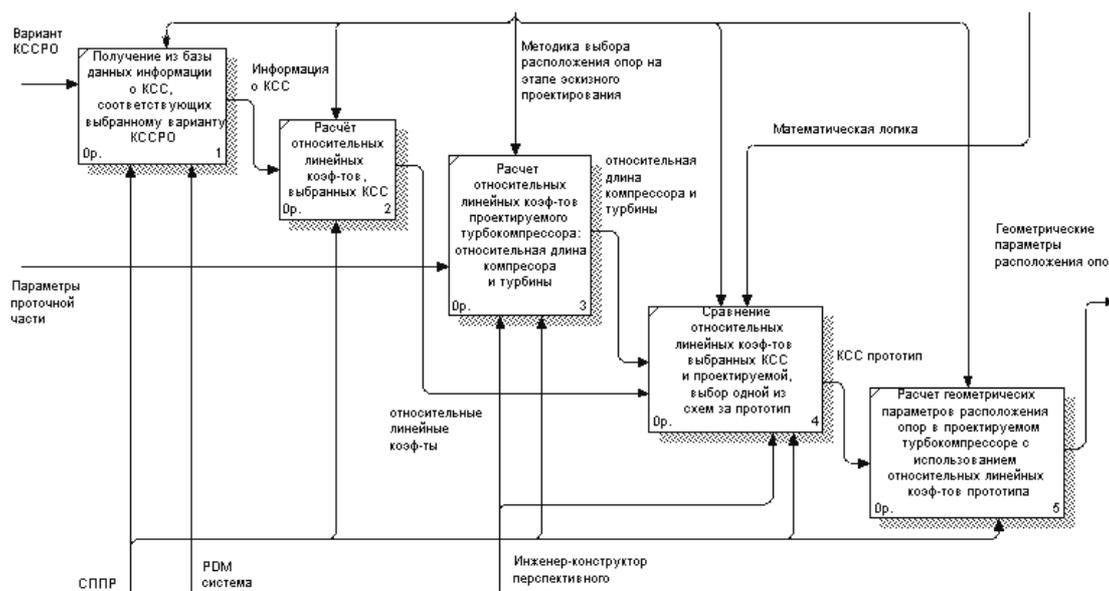


Рис. 8. Декомпозиция блока «Выбор уточненного расположения опор»

Это свойство может быть использовано для представления таблицы атрибутов (BOM – Bill of Materials), для управления предприятием в среде систем класса MRP-II. Каждый класс объектов имеет свои тип паспорта объекта и пиктограмму (табл. 2) в дереве проекта PDM-системы.

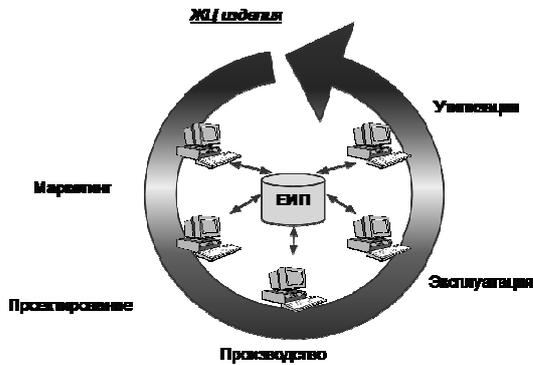


Рис. 9. Организация параллельной работы участников ЖЦ

Для каждого созданного класса объектов разрабатываются собственные формы представления информации средствами администрирования, т.е. интерфейс пользователя настроен для работы с так называемыми паспортами (или карточками учета) объектов.

При формировании технического задания создается файл в формате MS Word «ТЗ на проектирование двигателя», который прикрепляется к объекту. Для просмотра встроенным просмотрщиком файла задания используется вкладка «Просмотр» в паспорте объекта. В пас-

порте ТЗ указываются такие атрибуты, как общие сведения, состав двигателя, технические требования (рис. 11).

Таблица 2

Классы объектов PDM-модели	
ГТД-проект	Диск
ГТД-прототип	Лопатка
Конструктивно-силовая схема	Группа объектов
Компрессор	Постоянные данные
Турбина	Переменные данные
Сборочная единица	ТЗ на проектирование двигателя
Деталь	

После проведения термогазодинамического расчета ГТД заполняются сведения о двигателе в паспорте объекта «Двигатель», создается объект «Проточная часть» (рис. 12). В паспорте объекта «Конструктивно-силовая схема» (рис. 13) в PDM-системе содержатся такие атрибуты, как тип КСС двигателя, количество опор роторов (НД, СД, ВД), расположение и тип подшипника роторов, количество силовых поясов, относительные линейные коэффициенты и т. д.

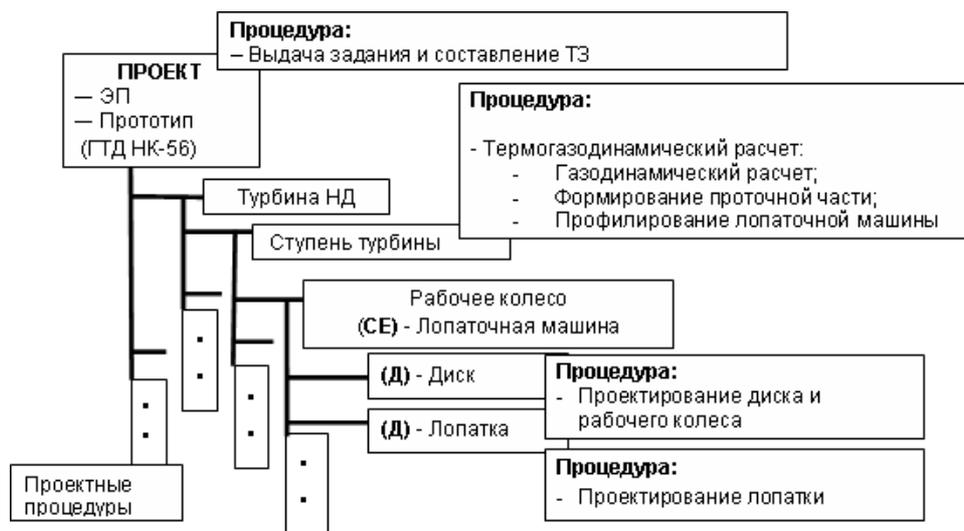


Рис. 10. Пример объектно-ориентированной модели данных о ГТД

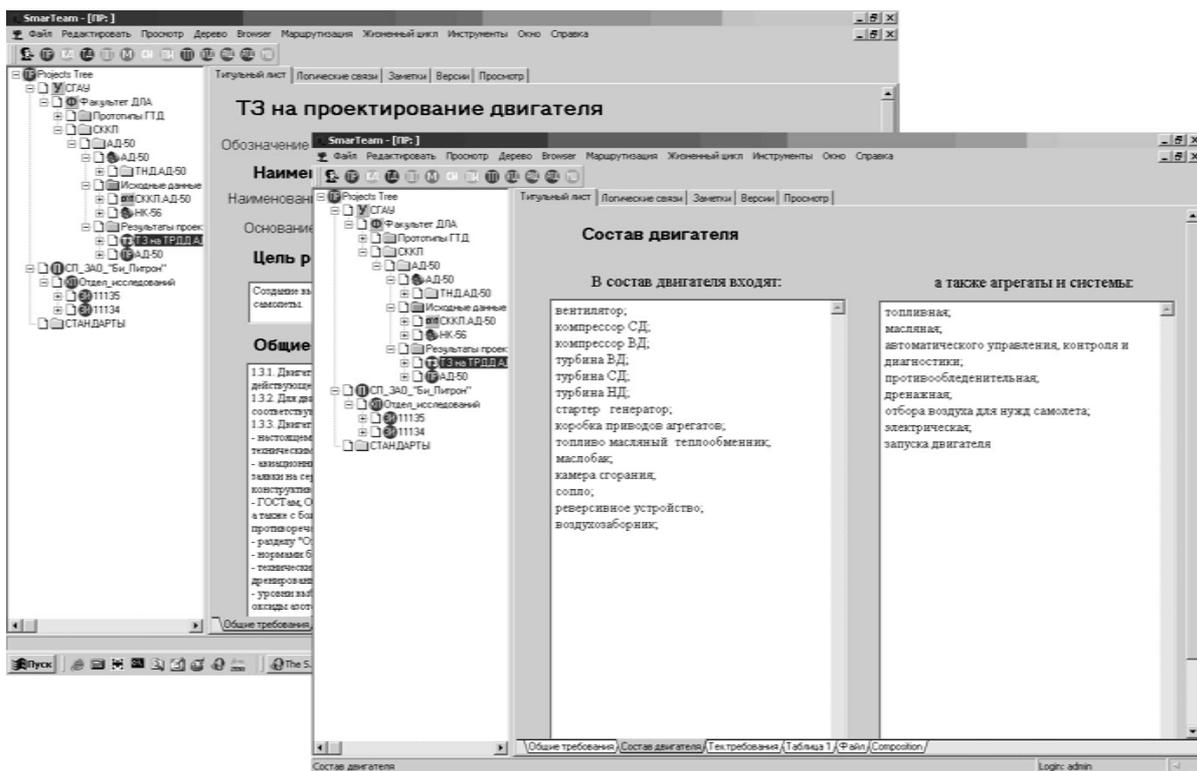


Рис. 11. Страницы паспорта ТЗ на проектирование двигателя

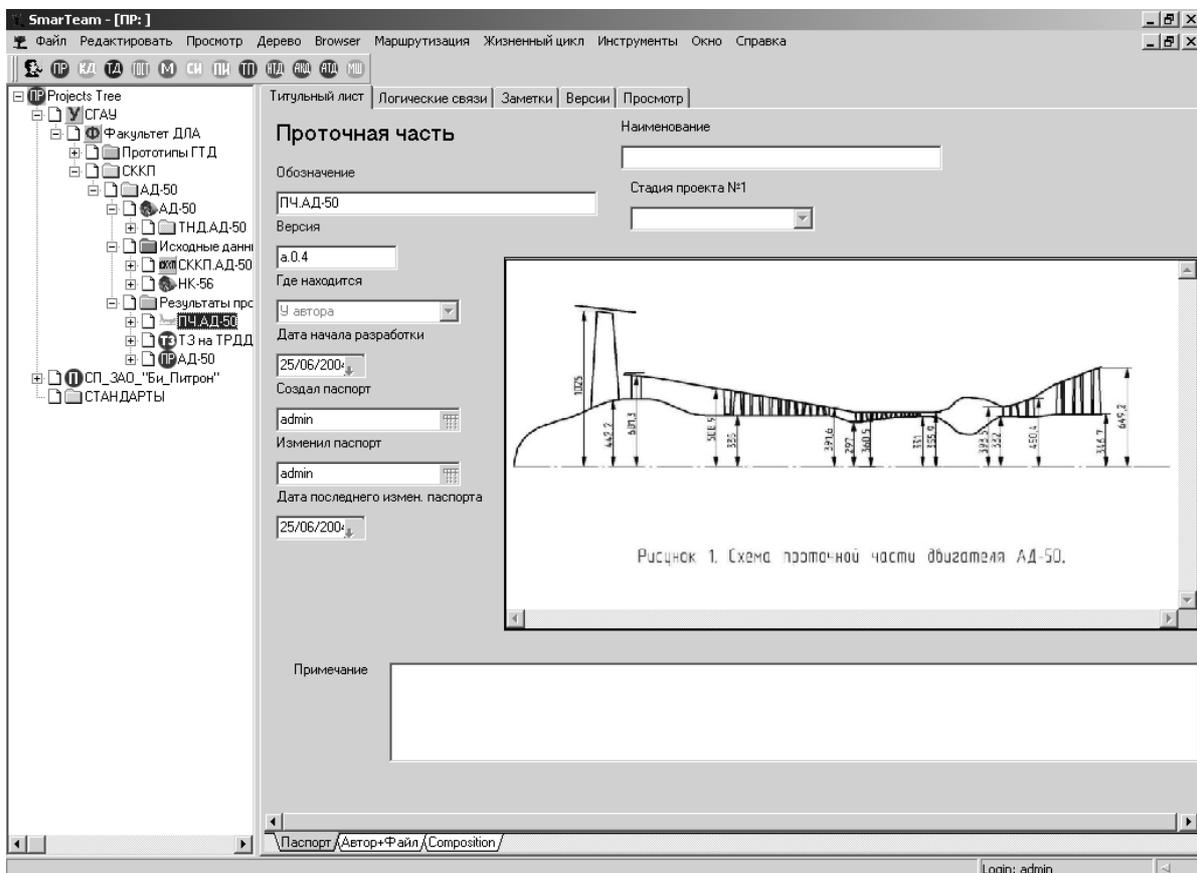


Рис. 12. Паспорт объекта «Проточная часть»

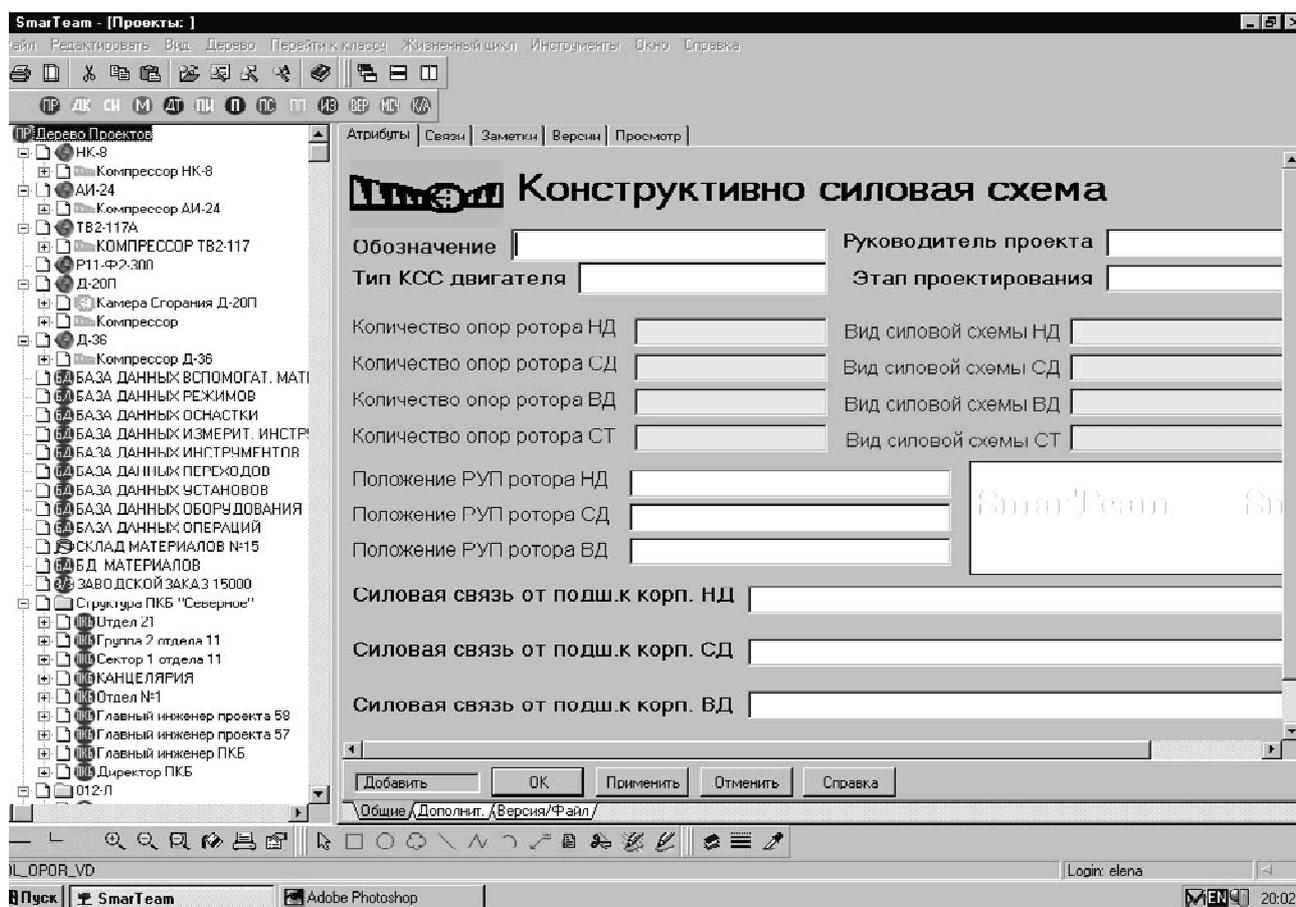


Рис. 13. Паспорт объекта «Конструктивно-силовая схема»

ВЫВОДЫ

Формализация этапа эскизного проектирования на основе методологии SADT позволяет конкретизировать состав участников проектирования, определить состав программных средств, типы используемых объектов и их атрибуты, сформулировать требования к отдельным программным модулям, предусмотреть их взаимодействие между собой, наметить пути дальнейшего совершенствования.

В результате использования средств математической логики, теории графов и ретроспективного анализа конструктивных схем ГТД сформирован метод автоматизированного выбора расположения опор в роторе турбокомпрессора ГТД. Предлагаемый метод выбора КСС реализуется системой поддержки принятия решения, построенной на основе универсальной экспертной системы (оболочки), что позволяет на этапе эскизного проектирования получить конструктивно-силовую схему турбокомпрессора с уточненным расположением опор и подобрать прототип для дальнейшего проектирования.

Разработанные классы объектов и их атрибуты составляют информационную модель ГТД, которая поддерживает все уровни иерархии описаний и представляется паспортами объекта в PDM-системе.

Предлагаемая организация работы на этапе эскизного проектирования авиационных ГТД позволяет устранить разрыв между функциональным и конструкторским проектированием, сократить время эскизного проектирования, повысить качество проектирования ГТД за счет работы в едином информационном пространстве на основе единой модели данных.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Тунаков А. П., Кривошеев И. А., Ахмедзянов Д. А. САПР газотурбинных двигателей. Уфа: УГАТУ, 2005. 272 с.
2. Ахмедзянов А. М., Сахabetдинов М. А., Алаторцев В. П. Эскизное проектирование авиационных двигателей: Учеб. пособие. Уфа: УАИ, 1984. 80 с.

3. **Marka D. A., McGovan K. L.** SADT: Structured Analysis and Design Technique. N.Y.: McGraw Hill, 1988.

4. **Калянов Г. Н.** CASE-технологии. Консалтинг в автоматизации бизнес-процессов. М.: Горячая линия – Телеком, 2002. 320 с.

5. Проектирование авиационных газотурбинных двигателей: Учеб. для вузов. М.: Машиностроение, 2000. 454 с.

6. **Филекин В. П.** Атлас конструктивных и силовых схем авиационных ГТД. Куйбышев: КуАИ, 1984. 104 с.

7. **Зрелов В. А., Миронов А. С., Проданов М. Е.** Метод автоматизированного выбора расположения элементов ГТД на схемном уровне// Проблемы и перспективы развития двигателестроения: материалы докладов междунар. науч.-техн. конф. Самара: СГАУ, 2009. Ч. 1. С.156–158.

ОБ АВТОРАХ



Сапожников Алексей Юрьевич, мл. науч. сотр. каф. авиац. двиг. Дипл. инженер по авиац. двиг. и энерг. установкам (УГАТУ, 2000). Иссл. в обл. САПР и комплексной автоматизации проектирования двигателей летательн. аппаратов и энергоустановок.



Кривошеев Игорь Александрович, декан факультета АД, проф., науч. рук. НИЛ САПР-Д. Дипл. инж.-мех. (УГАТУ, 1976). Д-р техн. наук по тепл. двигателям ЛА (2000). Иссл. в обл. инф. техн. в двигателестроении.



Зрелов Владимир Андреевич, доц. каф. конструкций и проектирования двигателей летательн. аппаратов СГАУ. Дипл. инж.-мех. по двигателям летательн. аппаратов (КуАИ, 1969). Д-р техн. наук по тепл. двиг. (СГАУ, 2008). Иссл. в обл. компл. автоматизации проектирования, изобретения и публикации в области конструирования элементов роторных систем двигателей летательных аппаратов.



Проданов Михаил Евгеньевич, доц. той же каф. Дипл. инж.-мех. по авиац. двиг. (КуАИ, 1983). Канд. техн. наук по тепл. двигателям (КуАИ, 1990). Иссл. в обл. компл. автоматизации проектирования, изобретения и публикации в обл. динамики и управления роторными системами двиг. летательн. аппаратов.



Цой Александр Юрьевич, инж. той же каф. Дипл. инженер по авиац. двиг. и энергетическ. установкам (СГАУ, 1998). Иссл. в обл. инф. технологий проектирования авиац. двигателей.



Миронов Андрей Сергеевич, асп. той же каф. Дипл. инж. по авиац. двиг. и энергетическ. установкам (СГАУ, 2007). Иссл. в обл. проектирования авиац. двиг. и энергетическ. установок.