

С. Г. Селиванов, С. Н. Поезжалова

ФУНКЦИОНАЛЬНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ИННОВАЦИОННЫХ ПРОЕКТОВ ВЫСОКИХ И КРИТИЧЕСКИХ ТЕХНОЛОГИЙ В АВИАДВИГАТЕЛЕСТРОЕНИИ

Предложена функциональная модель автоматизированной системы научных исследований (АСНИ) технологий и продемонстрировано применение нейронечеткого метода управления развитием высоких и критических технологий в авиадвигателестроении с применением функционального моделирования в виде информационной технологии работы обобщенно-регрессионной сети и использования нечеткой логики для формирования единых технологий авиационных двигателей нового поколения. С использованием средств искусственного интеллекта выявлены рациональные функции, описывающие развитие истребительной авиации и инновационных проектов для создания конкурентоспособной продукции. *Инновационный проект; АСНИ; высокие, критические, единые, узловые технологии; нейронная сеть; нечеткая логика; функциональная модель; сигмоида; логистическая функция; база данных; информационная технология*

Решение проблемы научно-обоснованного инновационного проектирования в авиадвигателестроении, создания новых поколений авиационных двигателей весьма часто сводится к технологическому обеспечению НИОКР. Разработка названной проблемы возможна средствами информационных технологий на основе использования автоматизированной системы научных исследований (АСНИ) высоких и критических технологий.

Для разработки информационной технологии АСНИ, проектирования и доводки авиационных двигателей нового поколения в рамках CALS-технологии и систем автоматизированного проектирования (САПР) необходимы специальные методы и средства системотехнического проектирования двигателей в их интеграции с моделями как силовых установок, так и самолетов. Сказанное позволяет организовать работу в вузах, государственных научно-производственных предприятиях, ОКБ и на предприятиях авиационного профиля по накоплению знаний в виде электронных баз данных (знаний), классификаторов и библиотек фрагментов функциональных моделей, конструкторских и технологических элементов, баз статистической информации. Использование таких компонентов в сочетании с АСНИ высоких и критических технологий позволяет повысить качество создаваемых двигателей и эффективность процесса их разработки.

Для ускоренной разработки инновационных проектов основным методом сокращения сроков создания и постановки на производство новых изделий является автоматизация технической подготовкой производства (АСТПП). В данной

публикации предложено дополнить известные методы АСТПП средствами искусственного интеллекта, которые обеспечивают математическое моделирование и оптимизацию объектов проектирования.

В инновационных проектах и программах для разработки предварительных комплектов технологической документации, а также проектных, перспективных и директивных технологических процессов, высоких и критических технологий, единых и узловых технологий, обеспечивающих создание техники новых поколений, рекомендуется использовать «Автоматизированную систему научных исследований высоких и критических технологий» (АСНИ высоких технологий). Она основана на следующих функциональных моделях (рис. 1, 2, 3). Названная система была разработана в целях технологического обеспечения работ по созданию авиационных двигателей нового поколения.

Предложенная функциональная модель АСНИ высоких технологий (рис. 3), построенная в среде BPWin 4.1 (IDEF0), содержит 5 блоков задач и 10 автоматизированных подсистем (программных продуктов), необходимых для автоматизации решения данных задач. Эта модель является базой для технологического обеспечения работ по проектированию и созданию авиационных двигателей нового поколения (разработки единых, базовых, узловых, высоких и критических технологий, а также комплектов проектных, перспективных и директивных технологических процессов), позволяет показать последовательность действий по выполнению технологических НИР для обеспечения НИОКР средствами инновационного проектирования авиационных двигателей [1, 2].



Рис. 1. Верхний уровень функциональной модели жизненного цикла изделия

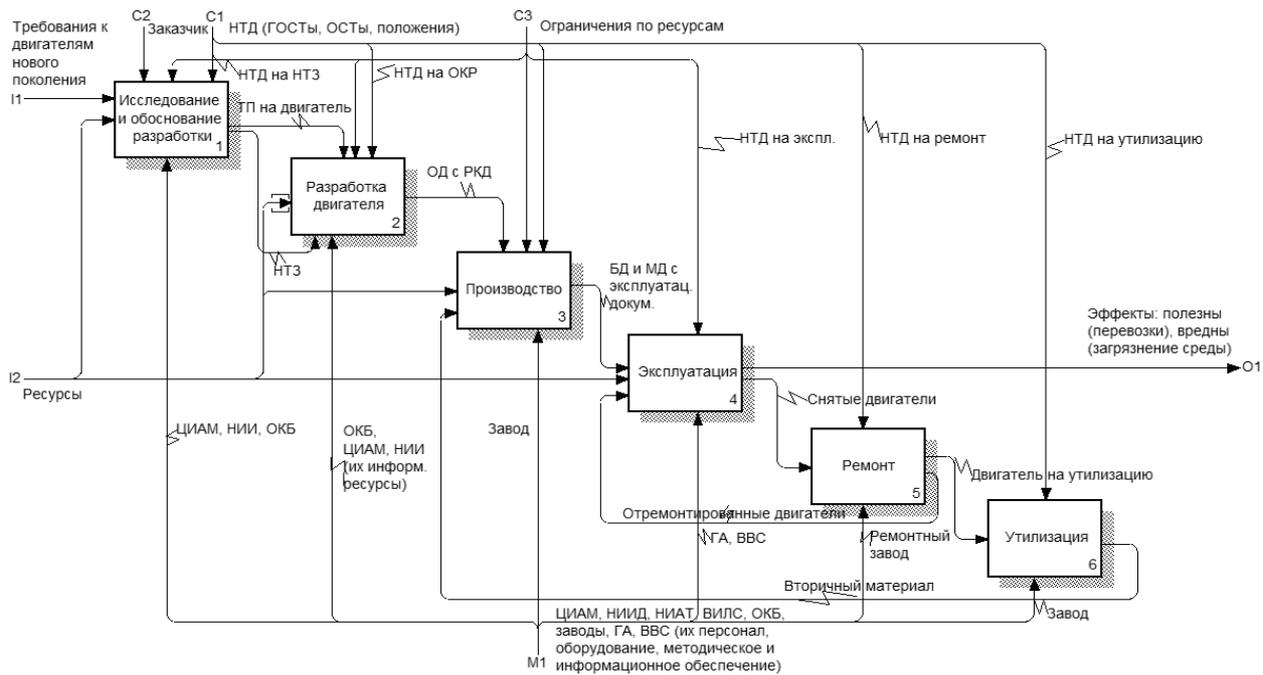


Рис. 2. Функциональная модель жизненного цикла авиационного двигателя [1, 2]

Рассмотрим более подробно блоки задач АСНИ высоких технологий.

Блок задач – анализ технического уровня авиационных двигателей. Результатом функционирования данного блока АСНИ высоких технологий является определение основных параметров технического уровня изделия, например, тяги двигателя и требований по технологическому обеспечению конкурентоспособности

новых изделий, которые должны дополнять результаты известных работ по определению базовых показателей технологичности конструкции в карте технического уровня и качества изделия.

Блок задач – систематизация патентной информации. Результатом функционирования данного блока являются технические предложения, выводы и обоснования по применению вы-

соких и критических технологий в ходе дальнейших опытно-технологических работ и НИ-ОКР авиационных двигателей нового поколения.

Блок задач – выбор высоких и критических технологий и формирование единых технологий авиационных двигателей нового поколения для системотехнической разработки инновационных проектов. Результатом работы АСНИ-высоких технологий по этим функциям является определение «ядра решений», определяющего перечни как отдельных разработок инновационных проектов по всем узловым технологиям нового авиационного двигателя, так и всего спектра работ по трансферу высоких и критических технологий, технологическому обмену и передаче прав на все промышленные образцы, полезные модели и патенты, определяющие состав единой технологии.

Блок задач – разработка комплектов проектной и директивной технологической документации. Этот функциональный блок включает в себя не только подготовку комплектов технологической документации инновационных проектов, но и построение календарных план-графиков, разработку бизнес-планов, которые необходимы не только для технологического проектирования, но и для оценки эффективности инвестиций в создание авиационных двигателей нового поколения.

Рассмотрим более подробно каждый из названных блоков задач, входящих в функциональную модель (рис. 3), обращая особое внимание на использование современных средств искусственного интеллекта в информационной технологии.

1 блок – анализ технического уровня авиационных двигателей.

Предложенная для определения закономерностей и тенденций развития авиационных двигателей нейронная обобщенно-регрессионная сеть (GRNN) решает задачи определения регрессий путем аппроксимации различных функций (рис. 4).

Для описания работы названной нейронной сети предположим, что имеется обучающая выборка $((x^1, y^1), (x^2, y^2), \dots, (x^N, y^N))$ (пары данных вход-выход), которая генерируется неизвестной функцией $F(x)$, искаженной шумом. Задача аппроксимации с помощью сети состоит в нахождении оценки неизвестной функции $F(x)$ и определений ее значений в других точках [4, 5, 6].

GRNN-сеть копирует внутрь себя все обучающие наблюдения и использует их для оценки отклика в произвольной точке (1).

Окончательная выходная оценка регрессионной зависимости в искусственной нейронной сети получается [6] как взвешенное среднее выходов по всем обучающим наблюдениям:

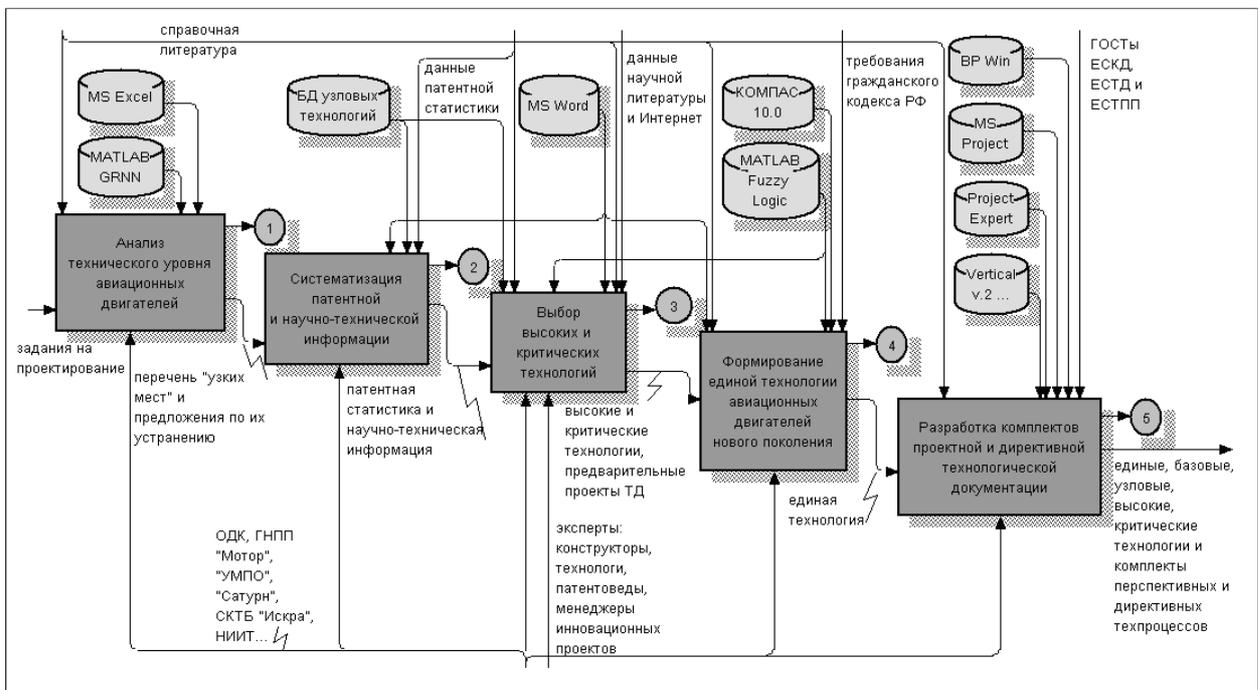


Рис. 3. Функциональная модель АСНИ высоких и критических технологий в авиадвигателестроении

$$y = \frac{\sum_{k=1}^N y^k \cdot \varphi \left(\frac{\|X - X^k\|}{\sigma} \right)}{\sum_{k=1}^N \varphi \left(\frac{\|X - X^k\|}{\sigma} \right)}, \quad (1)$$

где X^k, y^k – точки обучающей выборки.

Таким образом, искусственная нейронная сеть GRNN [6] является обобщенной моделью (рис. 4) развития любого инновационного проекта, множества инновационных проектов анализируемого поколения техники и технологий, а также закономерностей диффузии новых технологий при их коммерциализации.

Сигмоид в данном исследовании – это гладкая монотонная нелинейная S-образная функция, которую часто применяют для «сглаживания» значений параметров анализируемых инновационных проектов.

Ранее в научной литературе по инновационной деятельности под сигмоидом чаще всего понимали только логистическую функцию развития техники и технологий. В данной публикации показано, что применявшиеся ранее логистические закономерности – это только частные

случаи в виде локальных логистических зависимостей Фишера-Прая, Перла, Морриса и других зарубежных авторов [3, 4].

Логистическая функция (2) или логистическая кривая – это сигмоидальная S-образная кривая [3, 7, 8], изображенная на рис. 5. Она моделирует кривую роста вероятности некоего события, по мере изменения управляемых параметров развития.

Простейшая логистическая функция может быть описана формулой:

$$P(t) = \frac{1}{1 + e^{-t}}, \quad (2)$$

где переменную P можно рассматривать как численность некоторых объектов (изделий, технологий, численности людей и т. д.), а переменную t – как время.

Хотя область допустимых значений t совпадает с множеством всех действительных чисел от минус до плюс бесконечности, практически, из-за сущностной природы показательной функции $\exp(-t)$, достаточно вычислить значения только в сравнительно узком интервале.

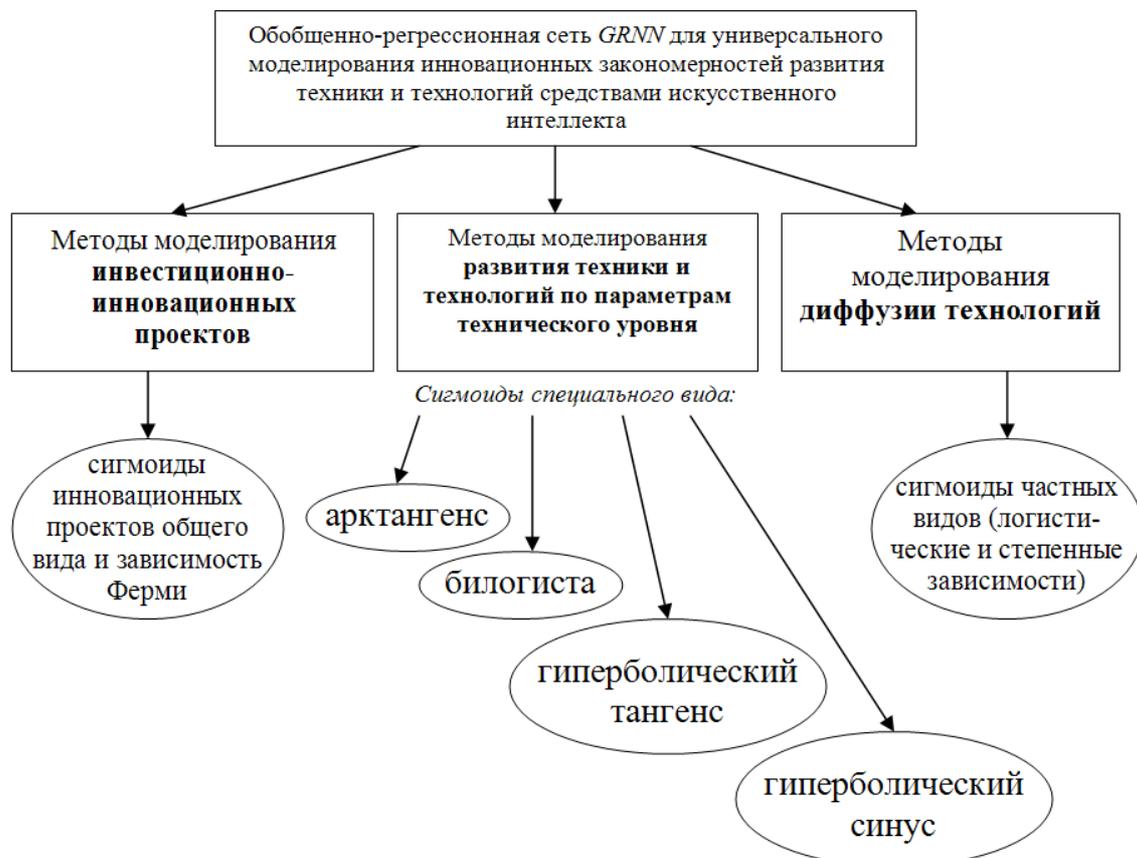


Рис. 4. Виды сигмоид и их применение в нейронных сетях для анализа закономерностей развития техники и технологий

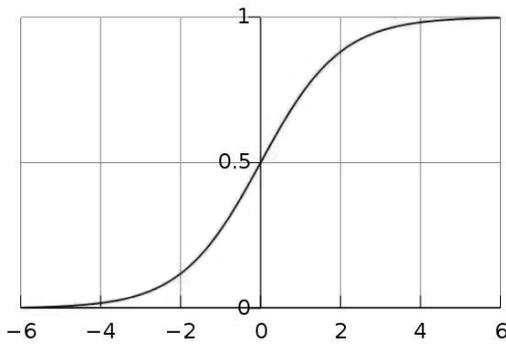


Рис. 5. Логистическая функция (сигмоида) общего вида

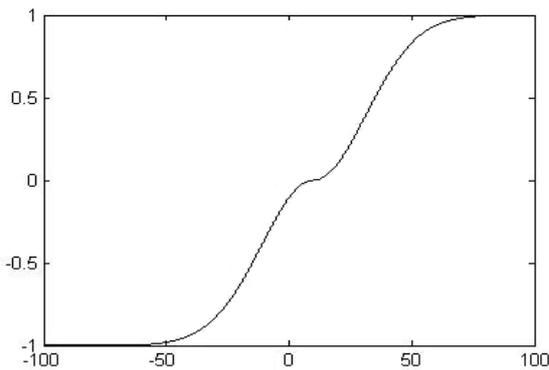


Рис. 6. Двойная логистическая функция

Логистическую функцию можно представить как решение простого нелинейного дифференциального уравнения первого порядка (3). Это уравнение, также известное как уравнение Ферхюльста (по имени впервые сформулировавшего его бельгийского математика), изначально появилось при рассмотрении модели роста численности населения, имеет вид [7, 8]:

$$\frac{dP}{dt} = P \cdot (1 - P), \quad (3)$$

где P – переменная, зависящая от времени t и с граничным условием $P(0) = 1/2$. Решение этого уравнения позволяет получить две наиболее распространенных формы записи логистической зависимости после интегрирования (4, 5, 6, 7):

$$P(t) = \frac{e^t}{e^t - e^c}, \quad (4)$$

или (выбирая постоянную интегрирования):

$$P(t) = \frac{e^t}{1 + e^t}. \quad (5)$$

Логистическая сигмоидальная функция тесно связана с гиперболическим тангенсом следующим соотношением (6, 7):

$$2 \cdot P(t) = 1 + \tanh\left(\frac{t}{2}\right). \quad (6)$$

Функция гиперболического тангенса с использованием экспоненциальной записи выглядит следующим образом:

$$f(s) = th \frac{s}{\alpha} = \frac{e^{\frac{s}{\alpha}} - e^{-\frac{s}{\alpha}}}{e^{\frac{s}{\alpha}} + e^{-\frac{s}{\alpha}}}, \quad (7)$$

где α – эмпирический коэффициент;

s – фактор крутизны.

Кроме рассмотренной логистической зависимости можно также рассмотреть двойную логистическую сигмоидальную кривую (рис. 6).

Двойной логистической является функция (8), подобная логистической функции (рис. 5) с многочисленными проявлениями сигмоид [3, 7, 8]. Ее общая формула имеет вид:

$$y = \text{sign}(x - d) \cdot \left(1 - \exp\left(-\left(\frac{x - d}{s}\right)^2\right) \right), \quad (8)$$

где d – локальный центр,

s – фактор крутизны.

Здесь «sign» представляет функцию знака. Эта кривая основана на гауссовском распределении и графически подобна двум идентичным логистическим сигмоидам, соединенным вместе в пункте $x = d$.

В семейство функций класса сигмоид также входят такие функции, как арктангенс, гиперболический тангенс [3] и другие функции подобного вида (9, 10), например:

- функция Ферми (экспоненциальная сигмоида) имеет следующий вид:

$$f(s) = \frac{1}{1 + e^{-2 \cdot \alpha \cdot s}}; \quad (9)$$

- рациональная сигмоида:

$$f(s) = \frac{s}{|s| + \alpha}. \quad (10)$$

Сигмоидальные функции находят применение в обширном диапазоне областей знания, включая искусственные нейронные сети, биологию, биоматематику, экономику, химию, математическую психологию, вероятность и статистику. В данной публикации рассмотрены возможности их применения в инновационном проектировании. Рассмотрим применение изложенных теоретических положений для определения регрессионных зависимостей развития инновационных проектов.

Анализ задач инновационного проектирования в АСНИ высоких технологий (рис. 3) и моделирования развития техники и технологий по параметрам технического уровня также демонстрирует меньшую предпочтительность логистических зависимостей для анализа тенденций

инновационного проектирования. Рассмотрим в этом плане вначале возможности применения искусственной нейронной сети GRNN [6] (рис. 7) для анализа закономерностей развития авиационных двигателей.

Ниже представлен фрагмент текста программы для нахождения аппроксимации функции арктангенса для авиационных двигателей дозвуковых самолетов-истребителей первого поколения (x – годы первого полета самолета с новым двигателем, y – значения максимальной тяги реактивного двигателя (кг), которые получены на основании известных публикаций [5]):

$$x = [1942; 1942; 1946; 1946; 1947; 1947; 1947; 1947; 1947; 1948; 1948; 1949; 1950; 1953];$$

$$y = [442,748; 442,748; 720,352; 720,352; 1019,580; 1019,580; 1019,580; 1019,580; 1019,580; 1019,580; 1750,000; 1750,000; 2480,420; 2779,648; 3027,263].$$

Имя нейронной сети, запрашиваемой в системе MATLAB 6.5 [6]: $b = \text{newgrnn}(x, y, 0.2)$.

В результате нейронная сеть определяет промежуточные значения точек по заданному оператором множеству точек оси абсцисс:

$$y1 = \text{sim}(b, [1943; 1944; 1945; 1951; 1952]).$$

В результате работы искусственной нейронной сети GRNN получаем значения функции на оси ординат:

$$y1 = 1,0 e + 003 \times \{0,4427; 0,5815; 0,7204; 2,7796; 3,0273\}.$$

Полученный ряд чисел определяет первую регрессионную зависимость (1) на рис. 8 для авиационных двигателей дозвуковых самолетов-истребителей первого поколения. В данном случае в качестве главного показателя, определяющего совершенство двигателя, выступает

тяга (кг) [5]. Ее изменения с течением времени подчиняются общим законам инноватики и имеют вид, представленный на рис. 8.

В следующих блоках (2, 3, 4) функциональной модели АСНИ технологий (рис. 3) осуществляется анализ патентной информации по авиационным двигателям новых поколений и формируется единая технология авиационных двигателей нового поколения. В этих функциональных блоках рекомендуется использовать средства искусственного интеллекта в виде метода нечеткой логики (Fuzzy Logic) [6] для автоматизации технологического проектирования.

В системе MATLAB 6.5 с помощью пакета «Fuzzy Logic» можно осуществлять поиск «ядра решений», которое опирается на результаты анализа патентной статистики (блок 2) и экспертных оценок, заключающихся в отборе наилучших технических предложений по узловым технологиям в целях создания реактивных двигателей нового поколения.

В пространственной форме совокупность имеющихся в электронной базе данных узловых технологий можно представить в виде поверхности (рис. 9), где по осям отложены оценки по данным патентной статистики (тяги, степени сжатия компрессора, температуры на турбине), а по вертикальной оси ординат – точка варианта узловой технологии.

Как видно из рис. 9, в нижней области находятся малоперспективные узловые технологии создания реактивных двигателей. В верхней области располагаются «высокие технологии», реализующие наиболее прогрессивные и оригинальные инновационные решения. В промежутке между этими областями имеют место промежуточные технологии.

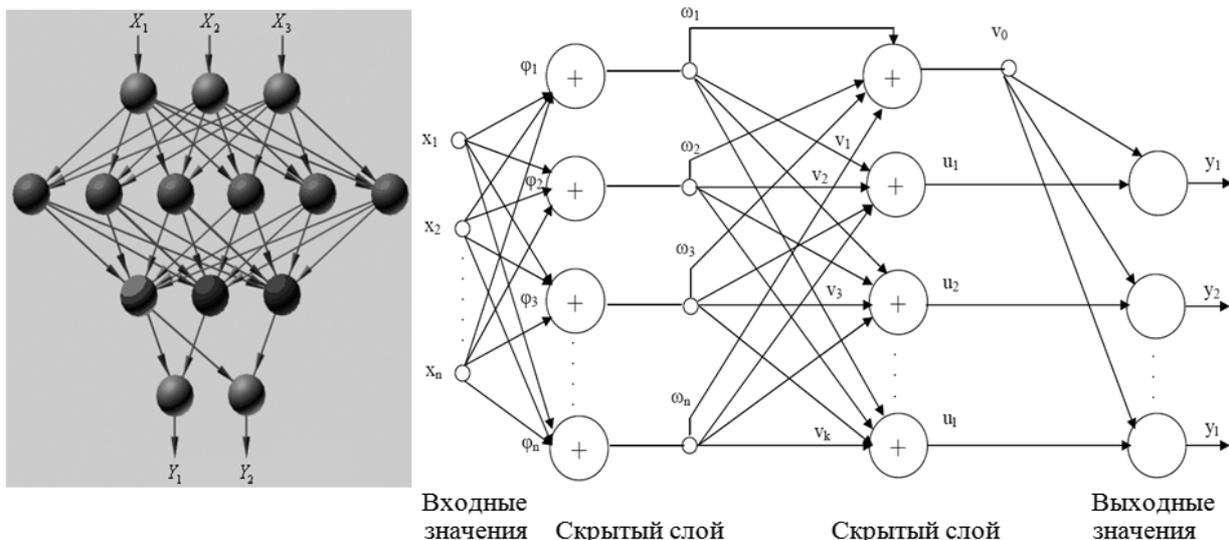
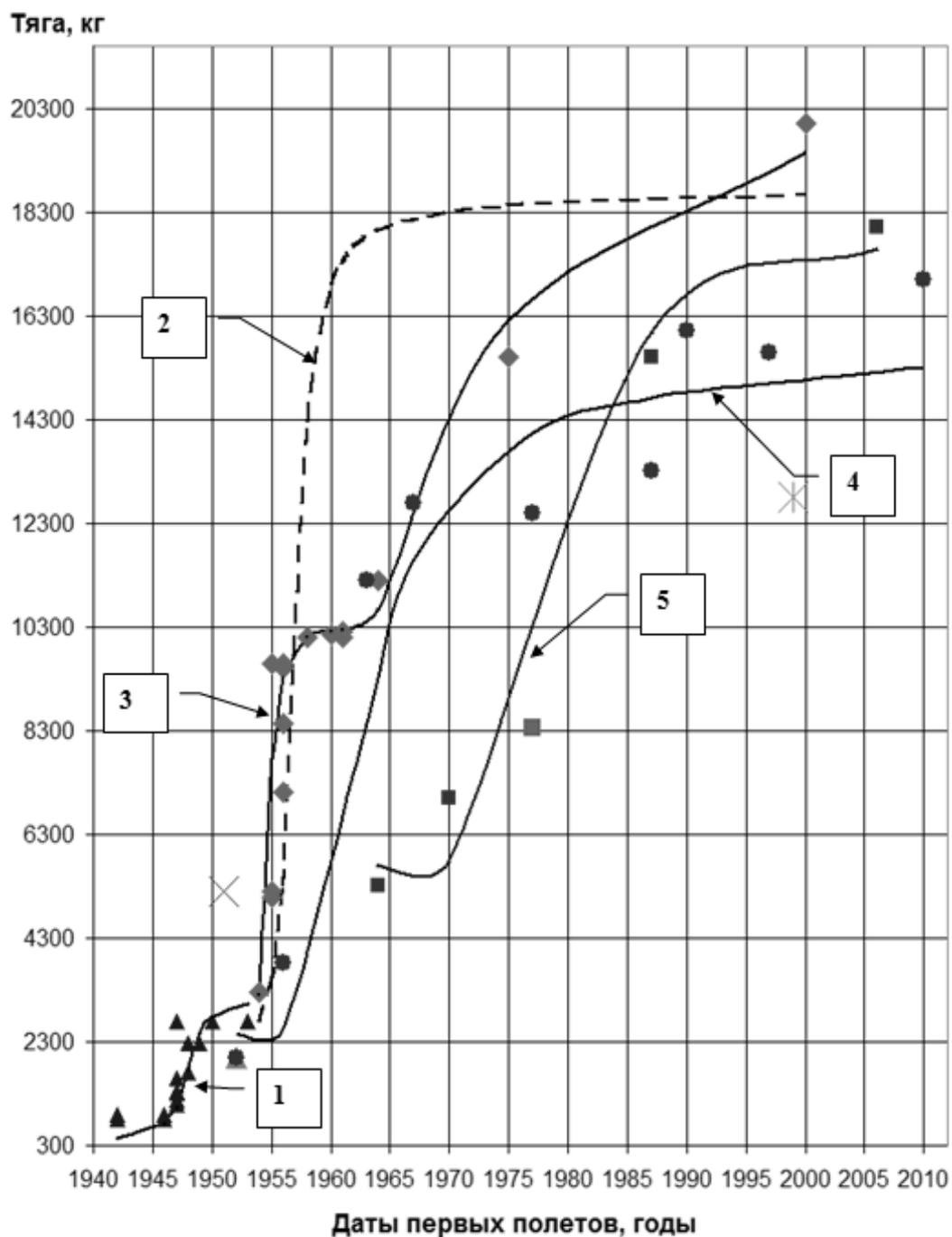


Рис. 7. Общий вид обобщенно-регрессионной сети (GRNN)



- ▲ Двигатели дозвуковых самолетов-истребителей
- ▲ Двигатель АМ-5 - кратковременное превышение скорости звука (особая точка)
- ◆ Двигатели сверхзвуковых истребителей-перехватчиков
- × Двигатель АЛ-5 - снят с испытаний вследствие низкой надежности (особая точка)
- Двигатели самолетов-истребителей вертикального взлета и посадки
- Двигатели многофункциональных высокоманевренных истребителей (истребителей-бомбардировщиков)
- Двигатель РД-33 (МиГ-29) - без многофункциональных модификаций (особая точка)
- × Двигатель АЛ-31Ф-3 - для учебно-тренировочного морского истребителя (особая точка)

Рис. 8. Обобщенные сигмоидальные закономерности развития авиационных двигателей отечественной истребительной авиации

На рис. 9 условно показана одна из S-образных кривых развития узловых технологий (в частности, вентилятора авиационного двигателя), а поверхность, таким образом, представляет собой множество вариантов развития узловых технологий, из которых можно выделить «ядро решений» для разработки единой технологии двигателя нового поколения.

После ввода в систему MATLAB 6.5 данных по экспертной оценке патентных документов (оценки их значимости для увеличения тяги, степени сжатия компрессора, температуры на турбине) поверхность развития несколько модифицируется, рис. 10.

Для системного анализа полученного «ядра решений» из области «высоких технологий» (рис. 10) на следующем шаге рекомендуется строить структурные модели в виде многовариантных сетевых графов [4, 5] развития единых технологий нового поколения авиационных двигателей, в которых обобщены только точки высоких узловых технологий, отобранные на предыдущем шаге анализа с использованием метода нечеткой логики.

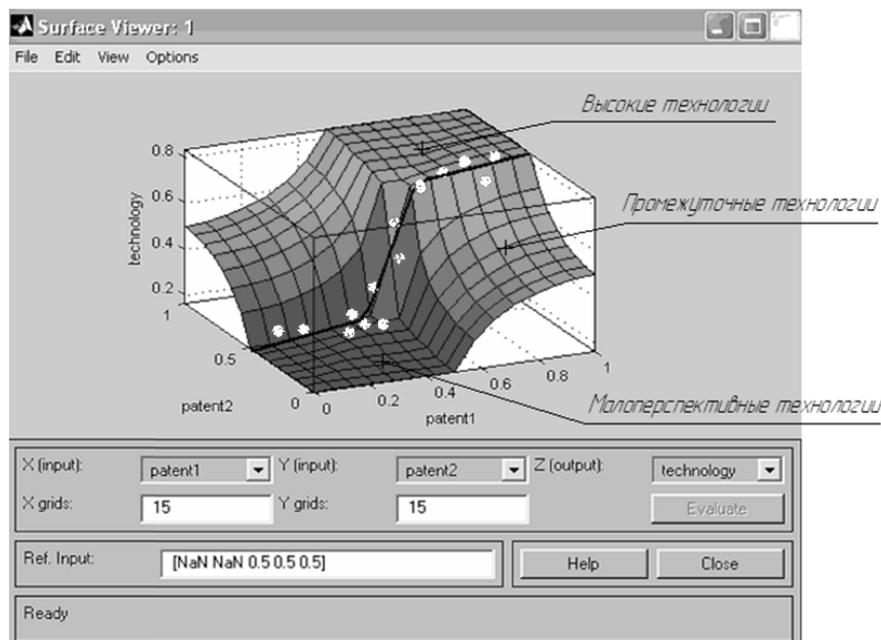
Многовариантный граф развития единых технологий является ядром возможных как конструкторских, так и проектно-технологических решений (в виде проектных, перспективных и директивных технологических процессов [4, 5]) для структурной оптимизации единых технологий.

Дальнейшая многокритериальная структурная оптимизация технологических процессов (проектных, перспективных и директивных) на сетевых графах может быть осуществлена с помощью теории статистических решений и теории игр, динамического программирования, использования искусственных нейронных сетей и других методов системного анализа технологий [3].

По результатам такого анализа на основании данных патентной статистики можно выделить перечень наиболее перспективных технологий для обеспечения новых конструкторских решений создания авиационного двигателя нового поколения, разработки предварительного комплекта технологической документации и проектирования директивных технологических процессов.

Пятый блок функциональной модели (рис. 3) предназначен для разработки проектных, перспективных и директивных технологических процессов.

Системотехнику использования АСНИ высоких технологий для технологического обеспечения НИОКР в авиадвигателестроении на различных этапах и стадиях конструкторской подготовки производства (технического предложения, эскизного проекта, технического проекта, разработки рабочей конструкторской документации) поясняют рис. 11–17.



○ – эмпирические точки, характеризующие патенты по узлу газотурбинного двигателя (пример)

Рис. 9. Теоретическая поверхность развития высоких технологий и формирования единых технологий авиационных двигателей

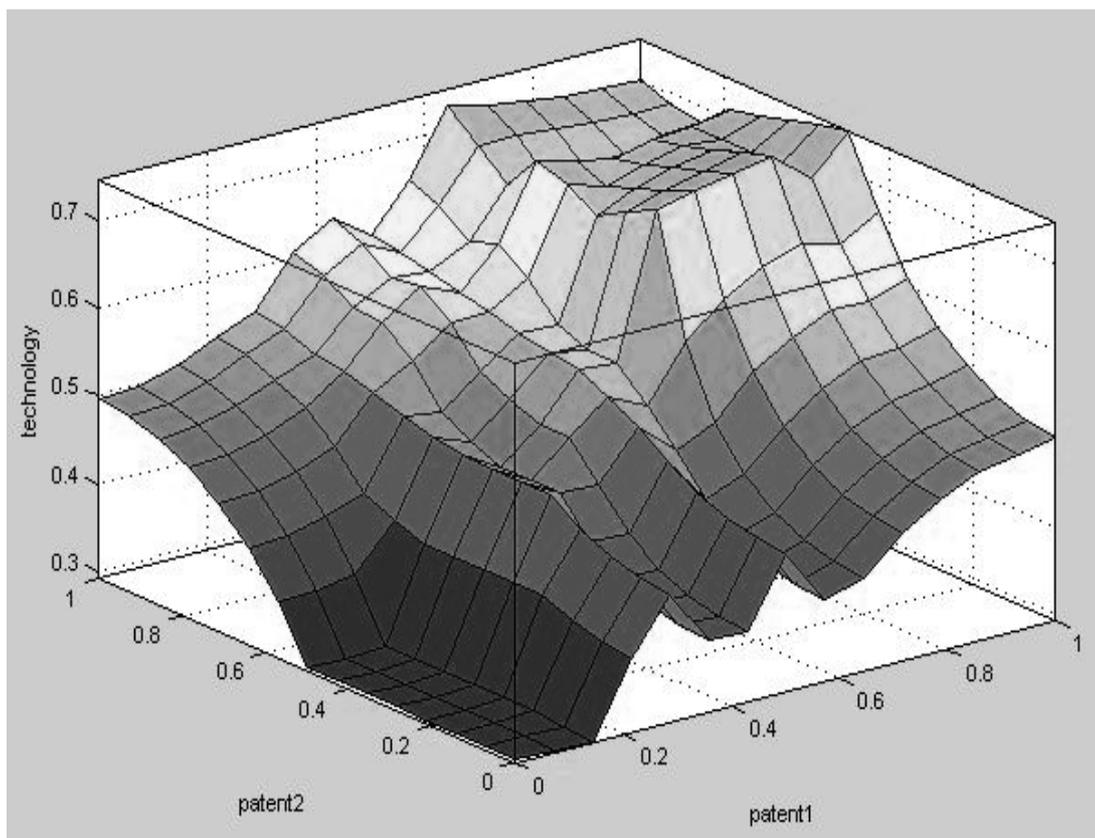


Рис. 10. Поверхность развития единых технологий авиационных двигателей по результатам экспертной оценки данных патентной статистики

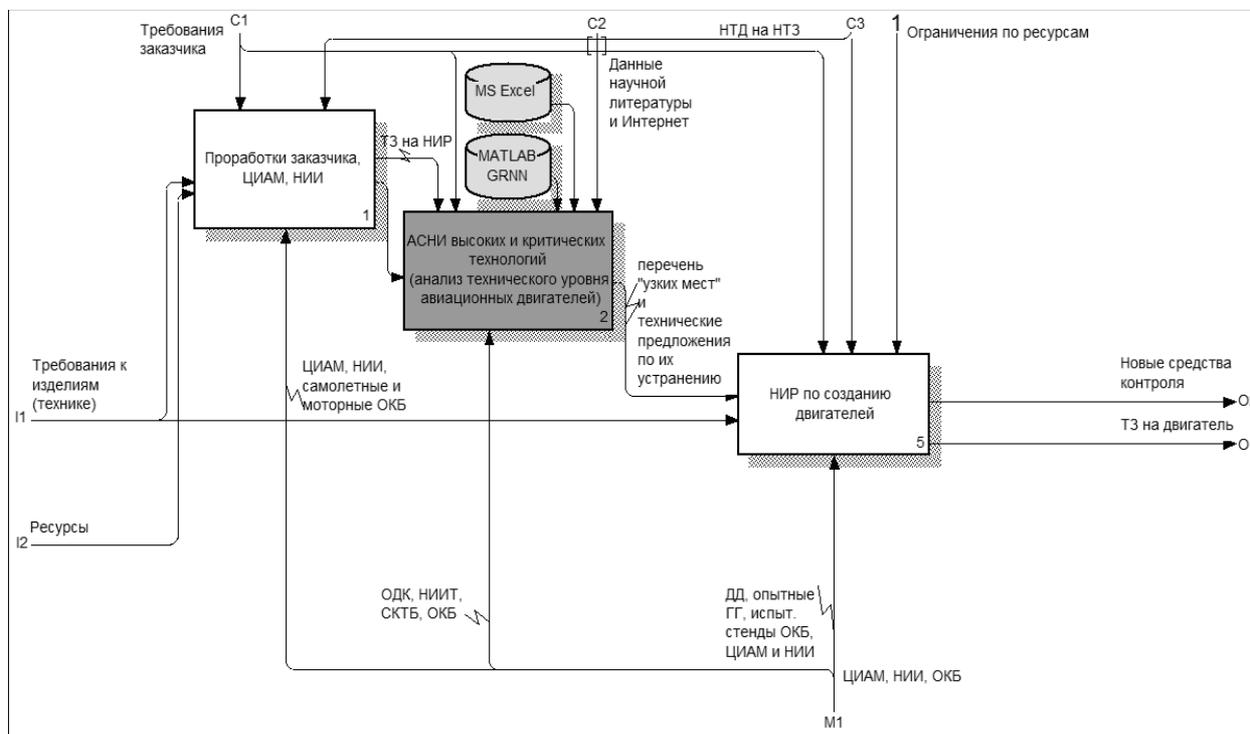


Рис. 11. Функциональная модель исследования и обоснования разработки двигателя с использованием АСНИ высоких технологий (1-й уровень)

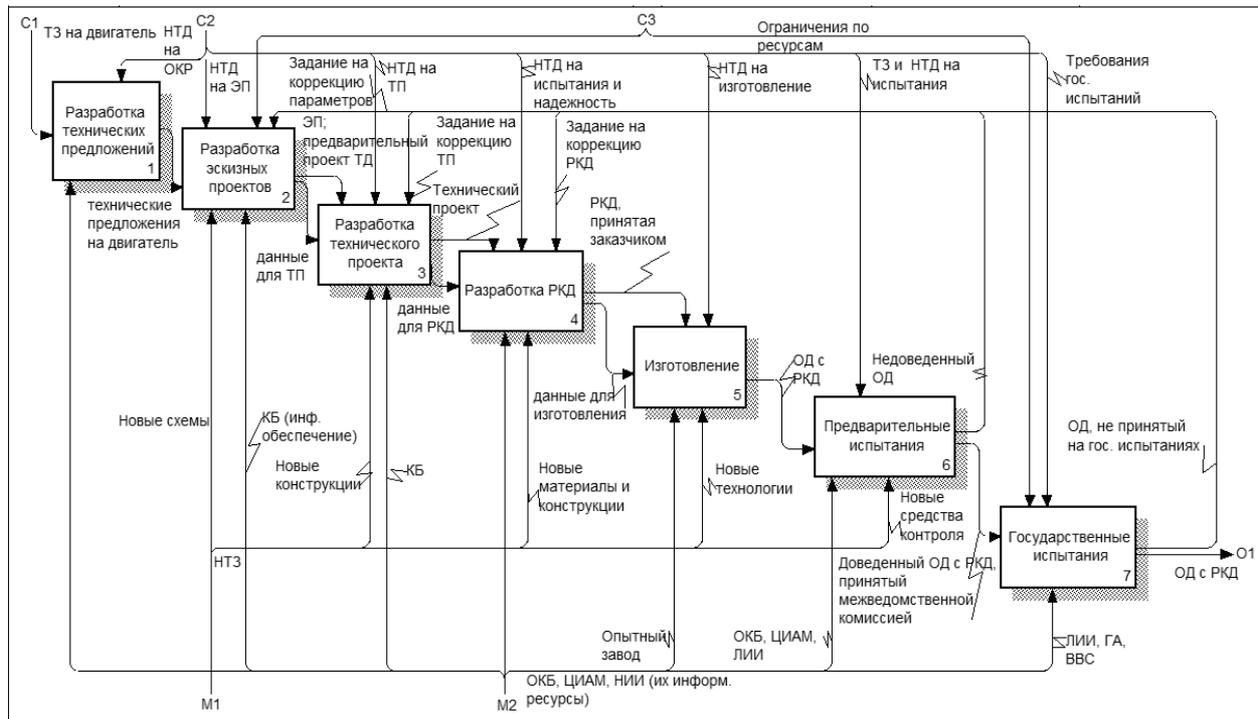


Рис. 12. Функциональная модель разработки двигателя согласно ЕСКД [1, 2]

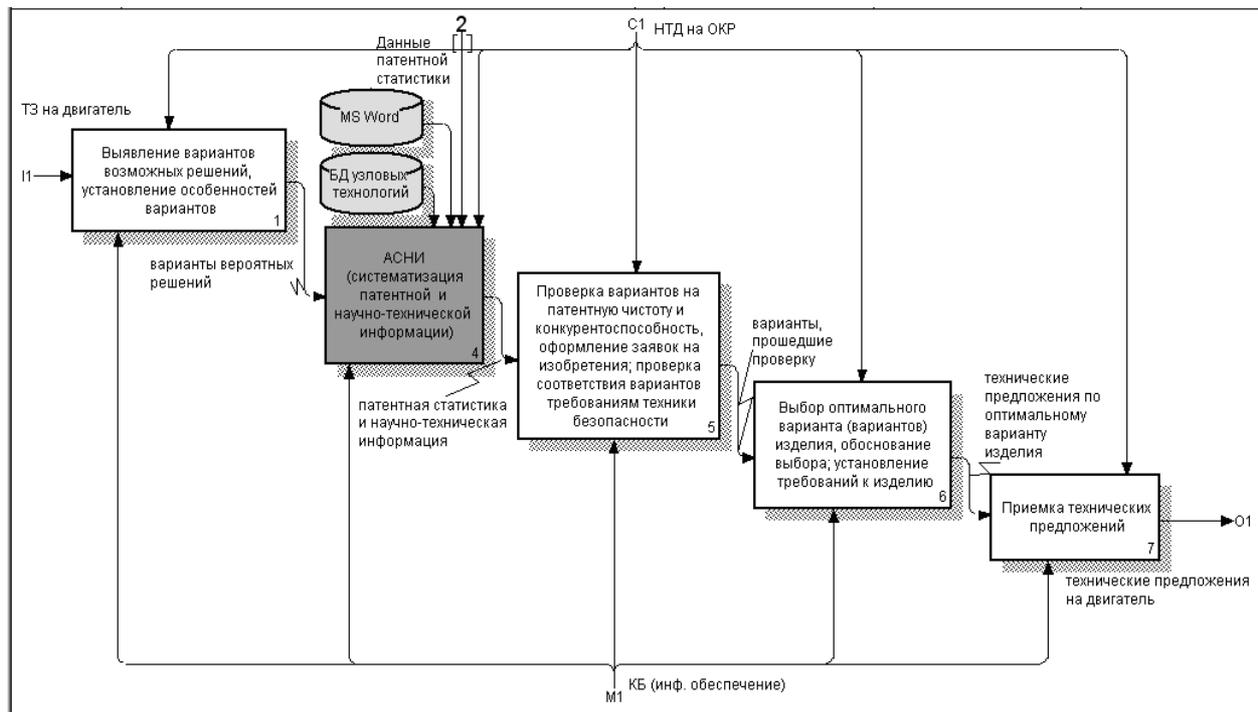


Рис. 13. Функциональная модель разработки технического предложения (2-й уровень)

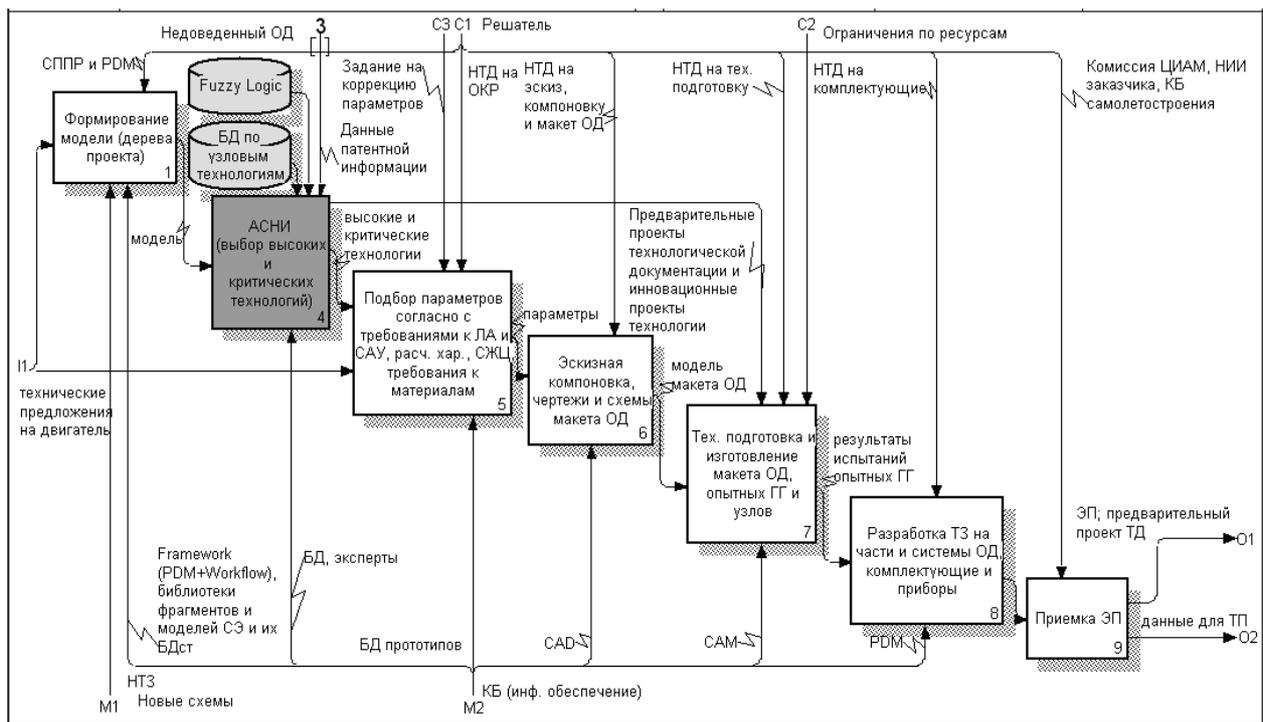


Рис. 14. Функциональная модель разработки эскизного проекта опытного двигателя (3-й уровень)

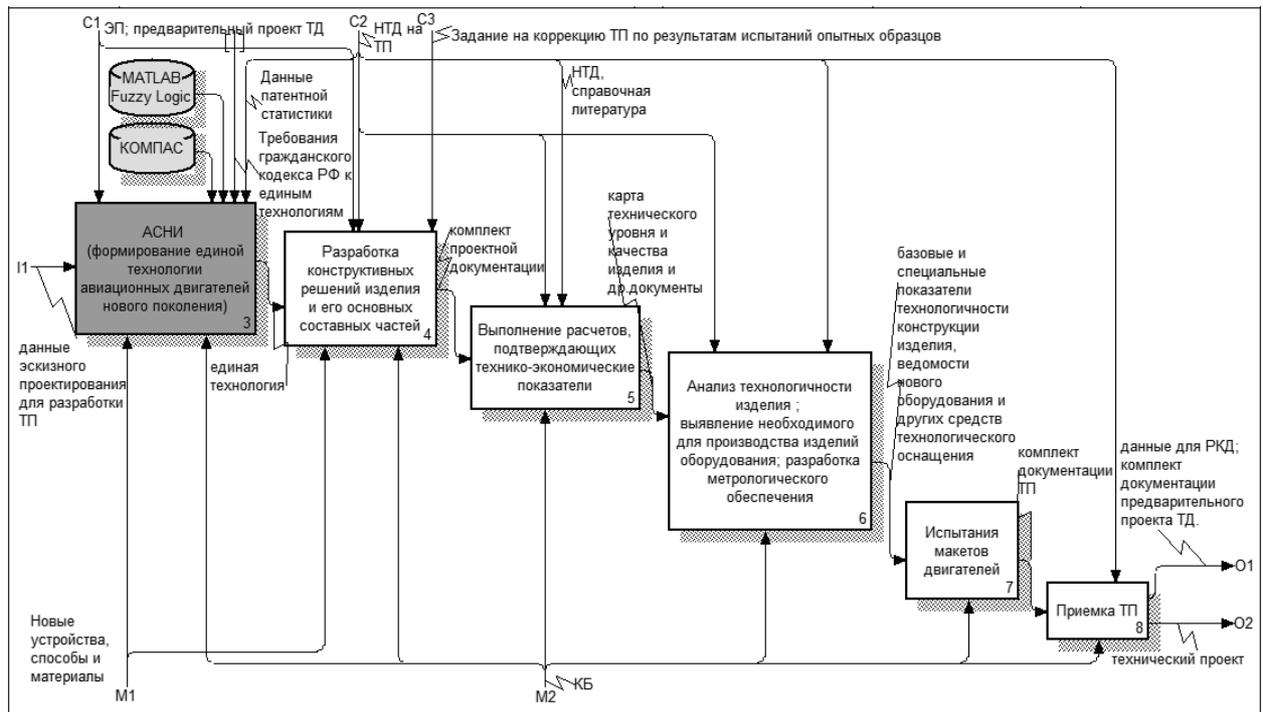


Рис. 15. Функциональная модель разработки технического проекта (4-й уровень)

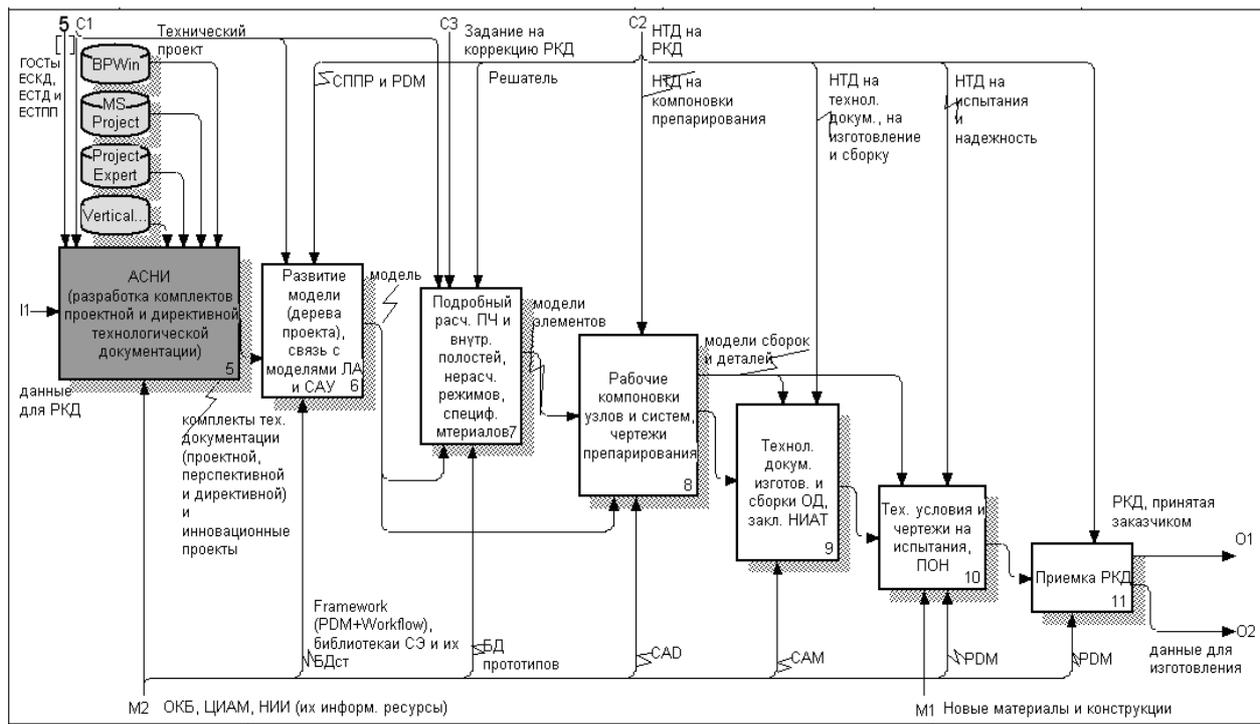


Рис. 16. Функциональная модель разработки рабочей конструкторской документации (5-й уровень)

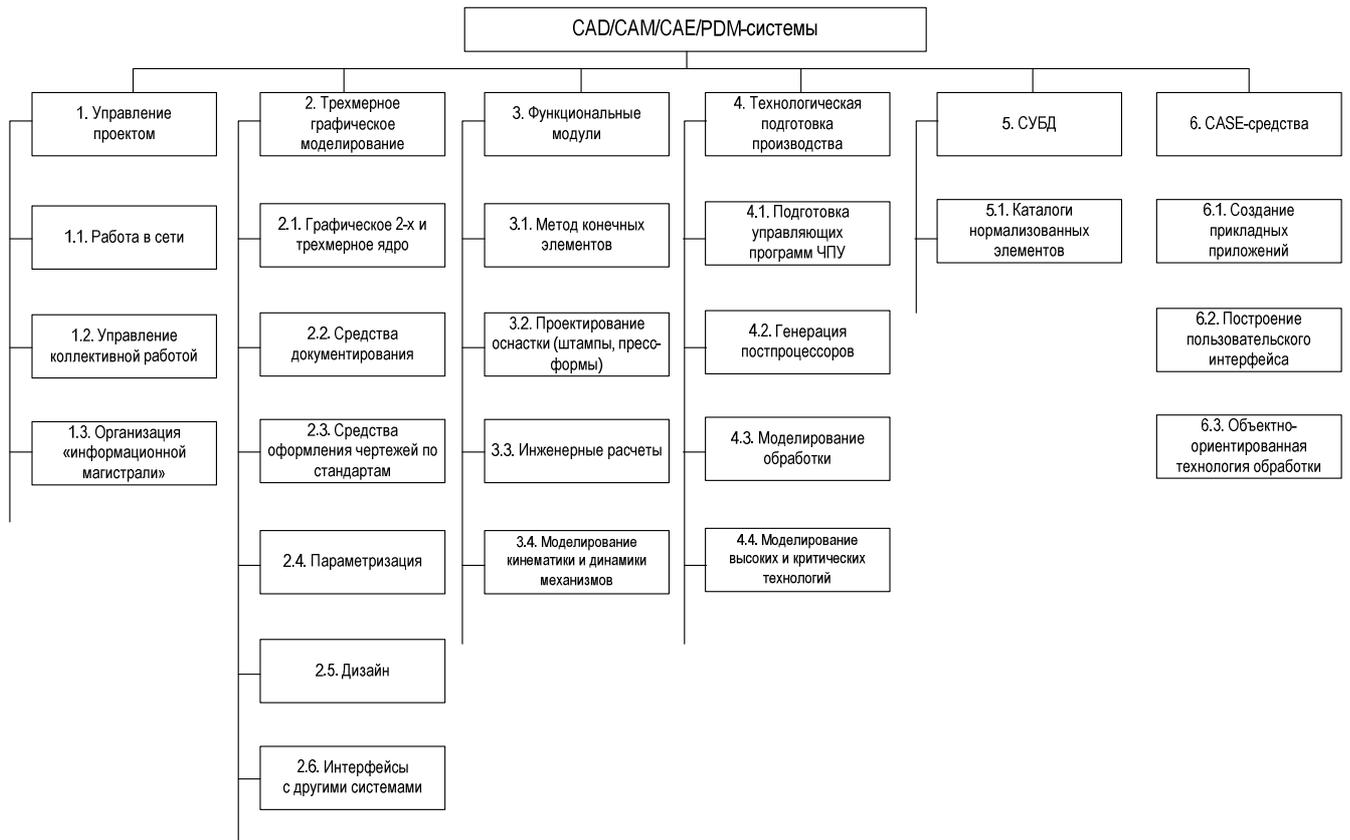


Рис. 17. Состав компонентов CAD/CAM/CAE/PDM-систем, учитывающий АСНИ высоких технологий

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработанные методы системного анализа развития авиационной техники и технологий позволяют в аналитическом виде с использованием средств искусственного интеллекта объяснить закон смены поколений техники и технологий ГТД. Объяснение этого закона основывается на статистическом описании отличий нескольких волн развития авиационной техники и технологий. S-образные закономерности развития авиационных двигателей, установленные в ходе работы, позволяют определить тенденции развития летательных аппаратов и их двигателей, а также разработать рекомендации по определению приоритетов их дальнейшего совершенствования.

Разработанная электронная база данных в системе MS Access по высоким, критическим и узловым технологиям авиадвигателестроения (вентилятор, компрессор, камера сгорания, турбина, форсажная камера и реактивное сопло) позволяет осуществить компьютерное моделирование единых технологий авиадвигателей нового поколения с использованием средств искусственного интеллекта.

Предложенный метод выбора высоких узловых технологий, основанный на использовании средств искусственного интеллекта в среде MATLAB 6.5, позволяет наглядно и доступно реализовать задачу поиска «ядра решений» для технологического обеспечения создания конкурентоспособных газотурбинных двигателей, что дает возможность конструкторам и технологам применить представленные в патентах и научной литературе знания для определения наиболее прогрессивных конструкторских и технологических решений в инновационных проектах создания и постановки на производство конкурентоспособных изделий нового поколения.

Разработанная информационная технология технологического обеспечения НИОКР и автоматизированная система научных исследований высоких и критических технологий авиадвигателестроения включает в себя помимо блоков анализа технического уровня авиационной техники, патентной информации, единых технологий техники нового поколения также методы и средства инновационного проектирования

(нормирования времени, разработки календарных план-графиков и бизнес-планов).

Таким образом, с помощью разработанной функциональной модели автоматизированной системы научных исследований можно обосновывать комплекты технологической документации, направленные на технологическое обеспечение создания перспективных авиационных двигателей нового поколения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Кривошеев И. А., Ахмедзянов Д. А.** Автоматизация системного проектирования авиационных двигателей: учеб. пособие. Уфа: УГАТУ, 2002. 61 с.
2. **Тунаков А. П., Кривошеев И. А., Ахмедзянов Д. А.** САПР газотурбинных двигателей: учеб. пособие. Уфа: УГАТУ, 2009. 292 с.
3. **Селиванов С. Г., Гузаиров М. Б., Кутин А. А.** Инноватика: учебник для вузов. М.: Машиностроение, 2008. 721 с.
4. **Селиванов С. Г., Поезжалова С. Н.** Автоматизированная система научных исследований высоких и критических технологий авиадвигателестроения // Вестник УГАТУ. 2009. Т. 13, № 1 (34). С. 112–120.
5. **Селиванов С. Г., Поезжалова С. Н.** Сопоставительный анализ инновационных закономерностей развития авиационных двигателей // Вестник УГАТУ. 2010. Т. 14, № 3 (38). С. 72–83.
6. **Дьяконов В. П., Круглов В. В.** MATLAB 6.5 SP1/7/7 SP2+Simulink 5/6. Инструменты искусственного интеллекта и биоинформатики: серия «Библиотека профессионала» М.: СОЛОН-ПРЕСС, 2006. 456 с.
7. **Кук Д.** Компьютерная математика. М.: Наука, 1991. 383 с.
8. **Шипачев В.С.** Высшая математика: учебник для вузов. М. : Высшая школа, 1998. 479 с.

ОБ АВТОРАХ

Селиванов Сергей Григорьевич, проф. каф. технол. машиностр. Дипл. инж. по автоматиз. и компл. механ. машиностр. (УАИ, 1970). Д-р техн. наук по технол. машиностр. (Мосстанкин, 1991). Иссл. в обл. технол. подг., реконстр., организ. пр-ва.

Поезжалова Светлана Николаевна, асп. той же каф. Дипл. спец. Иссл. в обл. высоких и критических технологий авиадвигателестроения.