

МАШИНОСТРОЕНИЕ • ТЕХНОЛОГИЯ МАШИНОСТРОЕНИЯ

УДК 658.5:001

С. Г. СЕЛИВАНОВ, С. Н. ПОЕЗЖАЛОВА

**МЕТОД МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ
И СТРУКТУРНОЙ ОПТИМИЗАЦИИ
ЕДИНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ В ИННОВАЦИОННЫХ ПРОЕКТАХ**

Предложен метод выбора и структурной оптимизации единых технологий создания газотурбинного двигателя на основании данных патентной статистики, известных промышленных образцов и полезных моделей для определения ядра решений высоких технологий. В результате проведенного анализа построен многовариантный граф развития единых технологий, представляющий собой совокупность высоких технологий, выявленных при реализации данных по патентным документам в пакете Fuzzy logic, по каждому узлу газотурбинного двигателя. *Единые технологии ; инновационное проектирование ; метод определения ядра решений ; структурная оптимизация ; метод нечеткой логики ; патентная статистика ; многовариантный граф развития единых технологий ; системный анализ ; узловые и базовые технологии изготовления авиационных двигателей*

Специалист, решивший посвятить себя разработке единых технологий и инновационной деятельности, должен иметь достаточно глубокие знания в области отечественного и зарубежного патентного законодательства. Этот комплекс правовых документов в настоящее время обобщает Гражданский кодекс Российской Федерации (Часть 4, №230-ФЗ). Он содержит раздел (Раздел VII), обеспечивающий правовую охрану результатов интеллектуального труда в следующих областях инновационной деятельности: создания произведений науки, изобретений, полезных моделей, промышленных образцов, секретов производства (ноу-хау), программ для ЭВМ, баз данных, топологий интегральных микросхем, а также единых технологий как результатов научно-технической деятельности, которые включают в том или ином сочетании изобретения, полезные модели, промышленные образцы, программы для ЭВМ или другие результаты интеллектуальной деятельности, служащие практической деятельности.

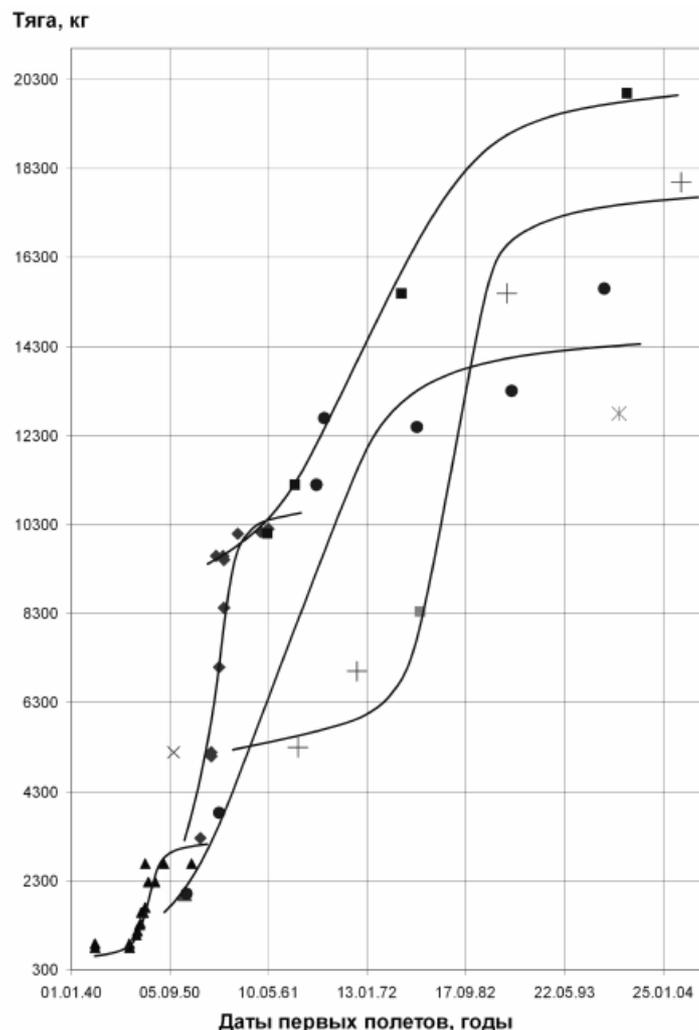
Лицо, которому принадлежит право на единую технологию, обязано подавать заявки на выдачу патентов. В его обязанности входит также подготовка документации на государственную регистрацию результатов интеллектуальной деятельности. Оно должно, при необходимости, вводить в отношении соответствующей информации режим сохранения тай-

ны, заключать договоры об отчуждении исключительных прав и лицензионные договоры с обладателями исключительных прав на соответствующие результаты интеллектуальной деятельности, входящие в состав единой технологии, и принимать меры по практическому применению данной технологии [1].

Все названные работы, как правило, выполняются в ходе инновационного проектирования. Вместе с тем разработка инновационных проектов, как новая область проектирования, в настоящее время еще недостаточно обеспечена методически в плане использования современных методов математического моделирования и оптимизации проектно-технологических решений [3]. В данной статье на примере решения задач разработки единых технологий авиационного двигателя, создания и постановки на производство двигателей нового поколения рассмотрен метод математического моделирования и структурной оптимизации единой технологии.

Постановка задачи в данном случае исходит из определенных нами ранее закономерностей смены поколений авиационных двигателей [2], рис. 1.

В данном случае в качестве главного показателя, определяющего совершенство двигателя, выступает тяга (кг), помимо этого, основными показателями в других случаях математического моделирования могут рассматриваться удельные показатели: удельный расход топлива, удельный вес двигателя и др.



- ▲ Двигатели дозвуковых самолетов-истребителей
- ▲ Двигатель АМ-5 (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 (особая точка)
- Двигатели дальних и высотных истребителей-перехватчиков

Рис. 1. Закономерности смены поколений авиационных двигателей самолетов-истребителей (истребителей-бомбардировщиков)

Из данного рисунка можно сделать вывод о том, что авиационные двигатели для многофункциональных высокоманевренных самолетов-истребителей (истребителей-бомбардировщиков) в настоящее время утрачивают свои конкурентные преимущества в сравнении с лучшими зарубежными аналогами. Таким образом, в инновационном проекте одной из главных задач создания авиационного двигателя пя-

того поколения должно быть повышение тяги при тех же массо-габаритных параметрах.

Для решения данной задачи предложен метод определения ядра решений для структурной оптимизации единых технологий создания газотурбинного двигателя на основании данных патентной статистики, известных как в нашей стране, так и за рубежом промышленных образцов и полезных моделей.

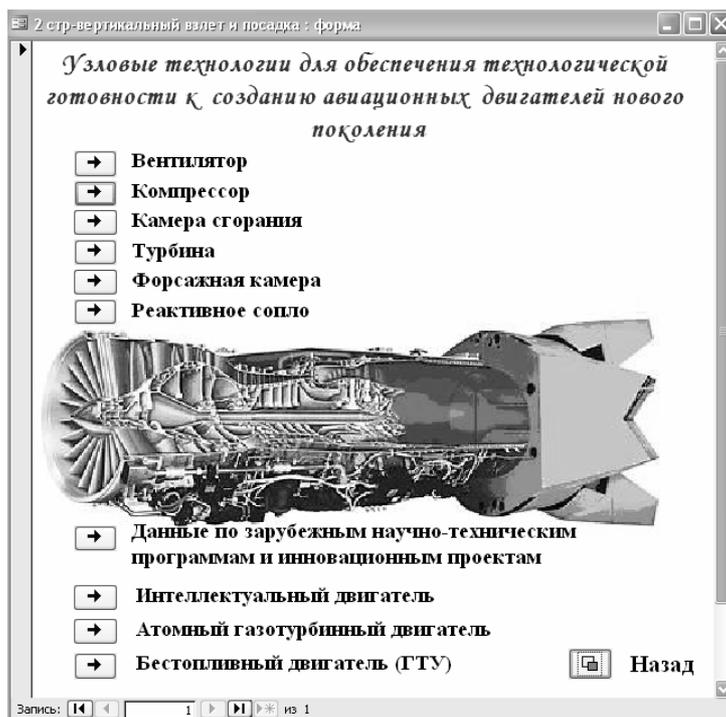


Рис. 2. Окно электронной базы данных по узловым технологиям авиационных двигателей в системе MS Access

В качестве основных средств математического моделирования в данном исследовании рассматриваются методы искусственного интеллекта: экспертные системы, нейронные сети, методы нечеткой логики, генетические алгоритмы. Основой рассматриваемого в данной публикации метода является применение комбинированной модели на основе применения экспертных систем и метода нечеткой логики, которые реализованы в системе MATLAB 6.5. Эти методы позволяют выполнять системный анализ разработанной в данном исследовании электронной базы данных по узловым технологиям, рис. 2.

Для решения задачи анализа данных патентной статистики по узловым технологиям газотурбинного двигателя (рис. 2) применен пакет Fuzzy Logic системы MATLAB 6.5. С его помощью можно осуществлять поиск «ядра решений», которое опирается на результаты экспертных оценок, заключающихся в отборе наилучших узловых технологий в целях создания реактивных двигателей нового поколения.

Система автоматизации расчетов при использовании метода нечеткой логики предусматривает следующие вычислительные процедуры:

1) формирование системы ввода-вывода информации: числовые значения входных (оценка патента) и выходных (технология) переменных преобразуются в переменные нечеткой логики в

зависимости от принадлежности к заданному множеству: низкая оценка (малоперспективная технология), промежуточная технология, высокая технология, которой соответствует «отличная» оценка. В качестве входных сигналов (input) принят кортеж патентов по каждому узлу трехвального газотурбинного двигателя, выходным сигналом (output) является отсортированная в ходе компьютерного моделирования узловая технология (см. рис. 3).

Для каждого патента по каждому узлу реактивного двигателя в качестве функций принадлежности выбран тип *trimf* и обозначен диапазон распространения [0; 1]. Для рассматриваемых в рамках решаемой задачи патентов имеется 3 участка:

- low, соответствующий низкой оценке патента по результатам экспертного заключения;
- average, характеризующий оценки, находящиеся в промежутке между низкими и высокими оценками;
- excellent, соответствующий оценке «отлично».

В рассматриваемом случае экспертиза осуществлялась по степени влияния нового устройства, способа или материала на главные критерии технического уровня (тягу двигателя или величины степени сжатия компрессора (π_k^*) и температуры на турбине ($T_{г}^*$), от которых также зависит тяга двигателя).

Реализация выбора и представления функций принадлежности для осуществления поиска «ядра решений» показана на рис. 4. Функции определены таким образом, что, начиная с экспертной оценки патента 0,7 и выше, данный патентный документ будет входить в массив данных ядра решений по единой технологии разрабатываемого в инновационном проекте авиационного двигателя. Левее точки 0,3 располагаются точки малоперспективных технологий.

2) формирование совокупности правил вывода, вида: ЕСЛИ..., ТО.... На рис. 5 приведено диалоговое окно записи базы правил на основе имеющихся входных и выходных переменных решаемой задачи. В данном случае в качестве оператора, связывающего входные переменные, выступает оператор OR («ИЛИ»), и для этих правил выбраны одинаковые приоритеты – 1. Так, если патент №1 имеет оценку отлично или патент №2 оценен на отлично, или патент №3 – отлично, или ..., то технология является высокой.

В диалоговом окне Rule Viewer (рис. 6) вводятся экспертные оценки по имеющимся патен-

там для каждого узла реактивного двигателя, затем производится их отбор. Патентные документы, находящиеся в первой строке вывода результатов, относятся к малоперспективным технологиям, в данном случае это – патент № 3. Во второй строке результатов находятся промежуточные технологические решения, им соответствует, например, патент № 2. Патенты, оказавшиеся в третьей строке результатов, имеют оценку «отлично», образуя массив так называемых «высоких технологий». Выполнив те же действия по каждому узлу реактивного двигателя (вентилятору, компрессору высокого и низкого давления, камере сгорания, турбине, форсажной камере и реактивному соплу), представляется возможным определить наилучшие варианты узловых технологий по созданию перспективного газотурбинного двигателя нового поколения. В данном случае (рис. 6) массив данных патентной статистики, определяющий «высокие технологии», выглядит следующим образом: [patent1, patent4, patent5].

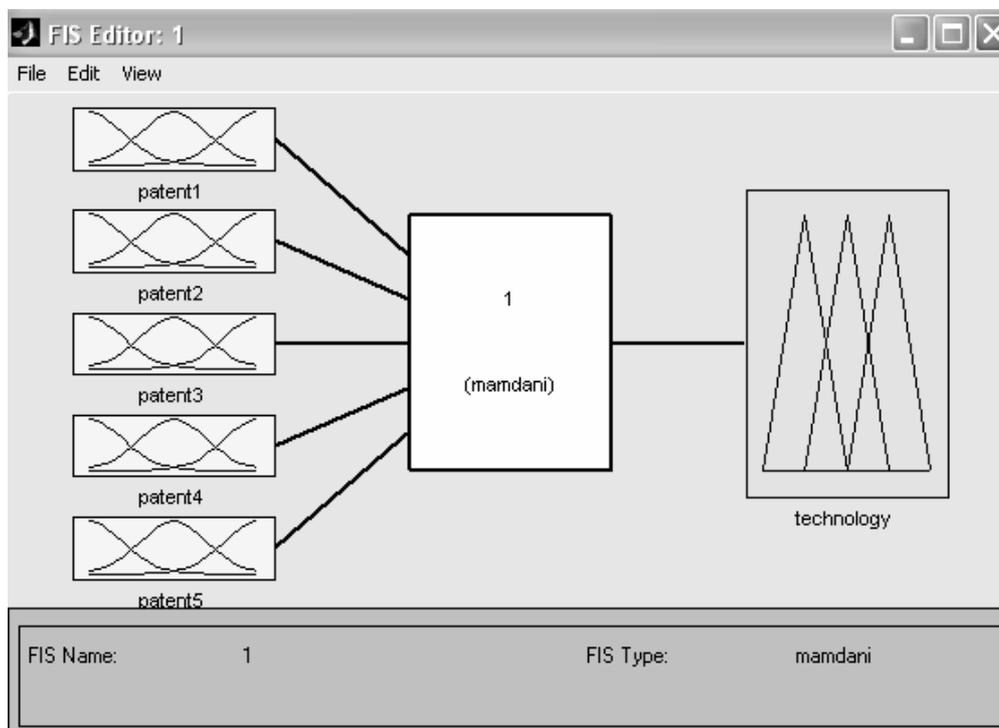


Рис. 3. Модель Fuzzy Logic для отбора узловых технологий по данным патентной статистики Patent 1, 2, 3, 4, 5 – номера патентов, содержащихся в электронной базе данных (рис. 2) по анализируемому узлу авиационного двигателя; Technology – разгруппированный массив узловых технологий

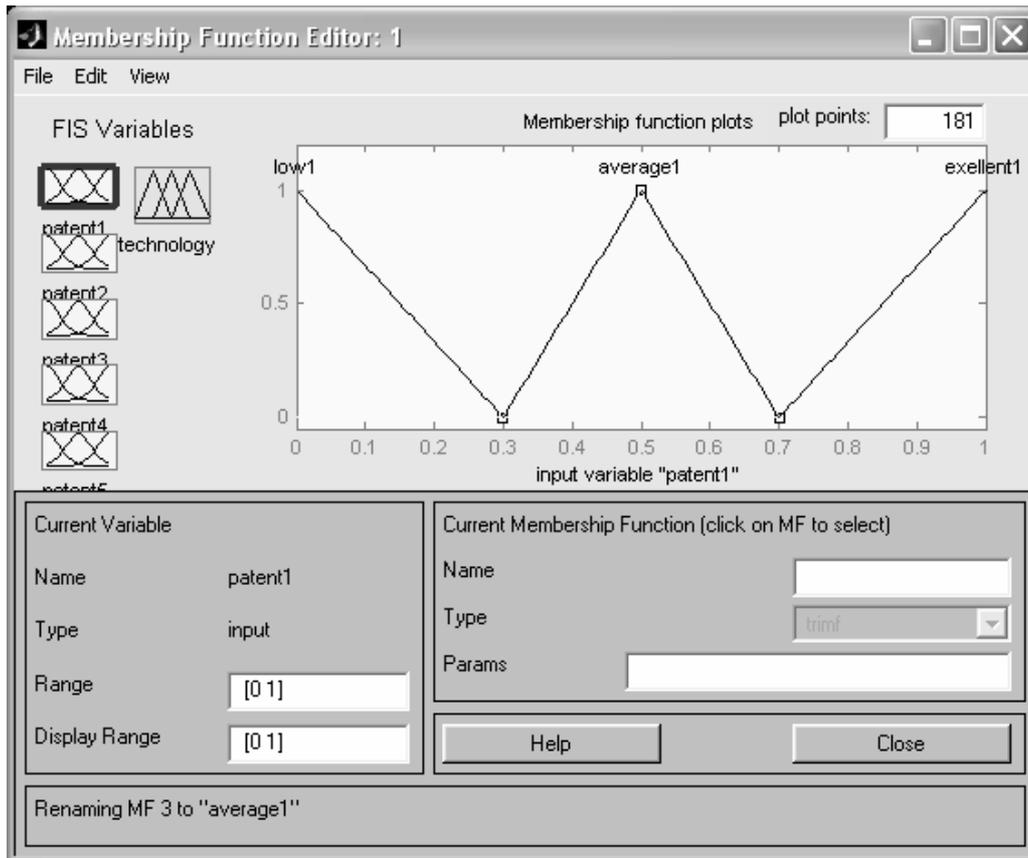


Рис. 4. Задание функций принадлежности патента различным областям развития технологии (окно Membership Function Editor системы MATLAB)

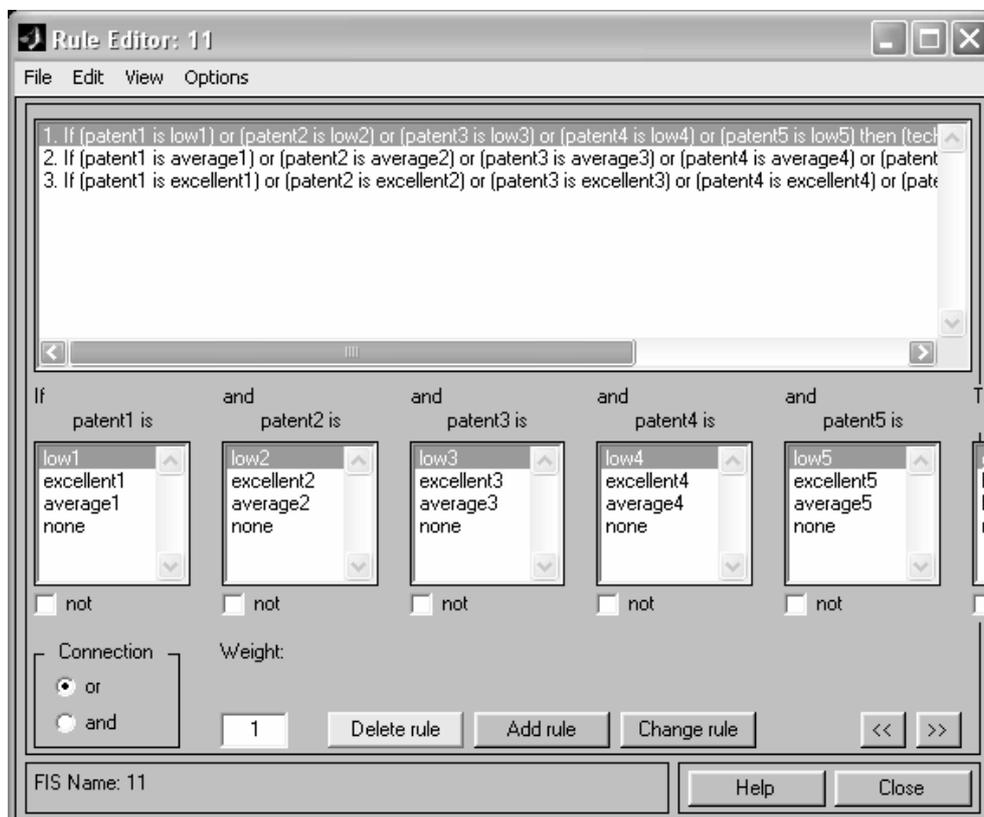


Рис. 5. Диалоговое окно записи совокупности правил для поиска «ядра решений» единой технологии авиационных двигателей

В пространственной форме совокупность имеющихся в электронной базе данных узловых технологий (рис. 2) можно представить в виде поверхности (рис. 7), 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. 7, в нижней области находятся малоперспективные технологии создания реактивных двигателей, в верхней области располагаются «высокие технологии», реализующие наиболее прогрессивные и оригинальные инновационные решения, соответственно, в промежутке между областями находятся промежуточные технологии.

В данной работе предлагается проводить отбор технологий, попадающих в область так называемых «высоких технологий», из имеющихся вариантов патентов, полученных по данным федеральной службы «Роспатент». На рис. 7 условно показана S-образная кривая развития

узловых технологий вентилятора авиационного двигателя, а поверхность представляет собой множество вариантов развития узловых технологий, из которых можно выделить ядро решений для разработки единой технологии двигателя нового поколения.

Для системного анализа полученного «ядра решений» на следующем шаге рекомендуется строить структурные модели в виде многовариантных графов развития единых технологий авиационного двигателя нового поколения, на которых обобщены только точки высоких узловых технологий (рис. 8), 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) для структурной оптимизации единых технологий.

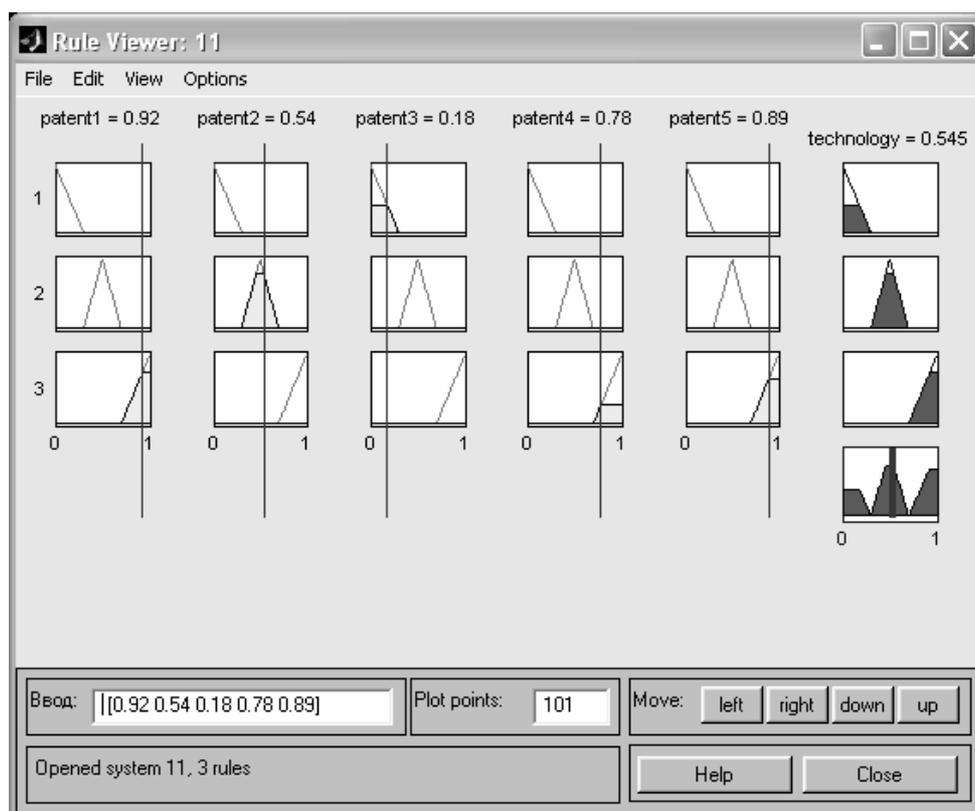


Рис. 6. Ввод данных по патентам для отбора «ядра решений» единой технологии авиационных двигателей

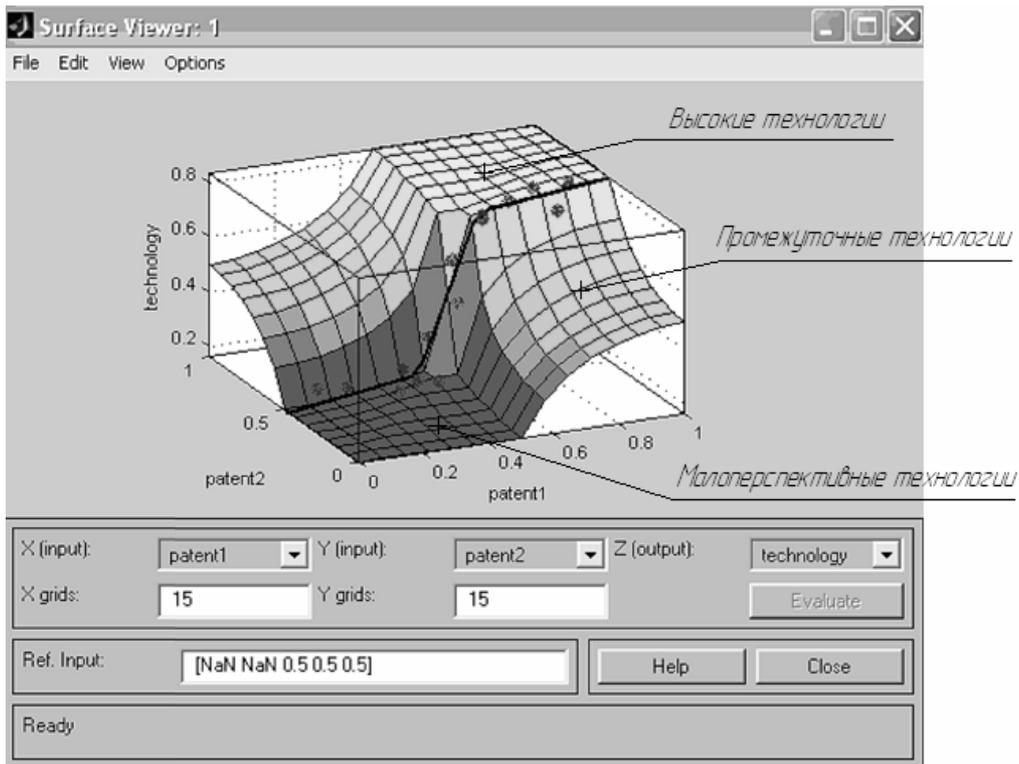


Рис. 7. Поверхность развития единых технологий авиационных двигателей (* – эмпирические точки, характеризующие патенты по вентилятору газотурбинного двигателя (пример))

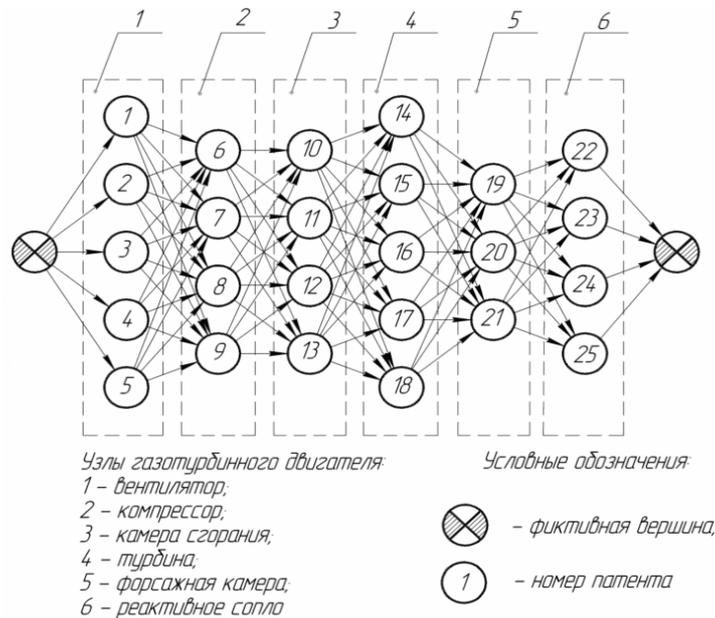


Рис. 8. Многовариантный граф развития единых технологий авиационных двигателей

Многокритериальная структурная оптимизация технологий 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 [4, 5].

По результатам такого анализа на основании данных патентной статистики можно выделить

перечень наиболее перспективных базовых технологий для обеспечения новых конструкторских решений создания авиационного двигателя, разработки предварительного комплекта технологической документации и проектирования директивных технологических процессов. Анализ данных, представленных в патентах, обобщенных в электронных таблицах (рис. 2),

позволяет назвать часть таких технологий, например:

1) узловые технологии изготовления вентилятора:

- изготовления корпусов из композиционных материалов, выполненных в виде одной детали, которая не требует существенной механической обработки;
- изготовления конструкций типа «блиск» с регулируемым положением лопаток вентилятора;
- установки воздушно-водородного теплообменника непосредственно за вентилятором, служащего для понижения энтальпии воздуха, сжимаемого вентилятором;

2) узловые технологии изготовления компрессора:

- изготовления конструкций типа «блиск» с регулируемым положением лопаток компрессора высокого давления;
- применения щеточных уплотнений;
- уменьшения доли воздуха, перепускаемого из-за последней ступени компрессора, величина которой в условиях взлета составляет не менее 10 % от общего расхода воздуха, за счет чего получается одновременное увеличение расхода воздуха и топлива в основную камеру сгорания, что облегчает процесс форсирования газотурбинного двигателя на сверхзвуковых скоростях полета, повышая тем самым реактивную тягу;
- введения в компрессоре промежуточного охлаждения воздуха, что позволяет теоретически повысить тягу двигателя в 2 раза;
- модификации рабочего колеса ступени осевого компрессора, которое дополнительно имеет профилированные вставки, представляющие собой лопатки малого удлинения, что способствует уменьшению сопротивления основному потоку и увеличению степени повышения давления (π_k) и КПД осевого компрессора;

- изготовления высоконапорного скоростного комбинированного компрессора, обеспечивающего степень повышения давления в диапазоне $\pi_k = 40-60$;

3) узловые технологии изготовления камер сгорания:

- использования камер сгорания с «плавающими стенками» из сплавов на основе кобальта, стойкого к окислению;
- создания системы управления модулем вектора тяги, воздействующей на парные детонационные трубки камеры сгорания для получения максимального значения величины тяги;

- создания по способу дополнительного сжатия воздуха в камере сгорания реактивного двигателя, заключающегося в подаче в камеру сгорания встречных потоков предварительно сжатого компрессором воздуха для дальнейшего увеличения величины основной тяги;

- снабжения газотурбинного двигателя дополнительной камерой сгорания, устанавливаемой перед турбинным ярусом ротора, имеющего автономные опоры, для повышения экономичности и увеличения тяговых характеристик;

- изготовления камеры сгорания адаптивного типа, что способствует улучшению полноты сгорания топлива, уменьшению удельного расхода и увеличению тяги авиационного двигателя;

4) узловые технологии изготовления турбин:

- производства охлаждаемых турбин высокого и низкого давления с противоположным вращением роторов, лопатками из монокристаллического сплава с термозащитными покрытиями и системой охлаждения, с дисками увеличенной трещиностойкости и работоспособными при высоких температурах;

- создания с помощью литья охлаждаемых лопаток газотурбинного двигателя из жаропрочных сплавов с монокристаллической структурой методом направленной кристаллизации с использованием керамических стержней сложной конструкции, что позволяет повысить температуру газа в турбине до 1800 °С, увеличив при этом ресурс в 3-5 раз на двигателях нового поколения;

- использования процесса последовательного присоединения дополнительных масс для создания мощности на валу турбины (за счет воздействия напором дополнительной газовой массы на лопатки создает суммарную реактивную тягу);

- создания канала высокого давления газового эжектора, соединенного с турбиной через камеру смешения, что позволяет увеличить тягу и КПД двигателя на сверхзвуковых скоростях полета;

5) узловые технологии изготовления форсажных камер:

- создания форсажных камер из несгораемого титанового сплава;

- оптимального профилирования диффузора, которые имеют возможности минимизировать потери полного давления в проточной части форсажной камеры;

- изготовления импульсной детонационной системы, содержащей форсажную камеру импульсной детонации, работающую в многоста-

дийном режиме, что обеспечивает рост температуры и повышение давления внутри газотурбинного двигателя и увеличение тяги двигателя;

б) узловые технологии изготовления реактивного сопла:

- изготовления плоского интегрированного с планером самолета сопла с отклонением менее чем за 1 с вектора тяги на $\pm 20\%$, створки такого реактивного сопла изготовлены на основе керамики;

- установки системы управления соплом с регулируемым вектором тяги для повышения надежности системы и увеличения тяги путем введения средств обеспечения перевода сопла в осесимметричное положение при отказе электронного регулятора сопла;

- изготовления адаптивных пилонов, разделяющих реактивную струю на ряд струй меньшего размера, для создания сопла со сниженным уровнем шума на взлетном режиме и низкими потерями тяги на режиме крейсерской сверхзвуковой скорости;

- создания отраженных детонационных волн, истекающих через реактивное сопло для дополнительного увеличения осевой составляющей силы тяги.

Определенные узловые технологии определяют некоторые требования как для какого-либо конкретного узла авиационного двигателя, так и для остальной части конструкции двигателя в целом, например, применение биротативной турбины требует внедрения биротативного компрессора.

Анализ данных, представленных в патентах, обобщенных в электронных таблицах (рис. 2), позволяет кроме узловых технологий назвать также основные направления развития базовых технологий:

1) для вентилятора газотурбинного двигателя:

- точечную сварку (защитных колец), ковку (защитных колец из стали, титана, суперсплава на основе никеля; колец жесткости из алюминия; корпусов вентилятора из стали, титана или алюминия);

- изготовление корпусных деталей вентиляторов методом деформации и сварки;

2) для компрессора:

- нанесения покрытия на лопатку методом магнетронного распыления материала. В качестве материала распыления используют серебро;

- создания штампов для получения фланцев на концевых заготовках методом осадки для

сохранения стабильности механических свойств и повышения надежности лопаток компрессора;

- использования способа получения композиционного материала для лопаток компрессора на основе интерметаллида титана, армированного волокном карбида кремния, этот способ включает изготовление пористой заготовки, содержащей армирующие волокна и порошок титана, пропитку пористой заготовки под давлением расплавом алюминия;

- ионного травления;

3) для камеры сгорания:

- лазерной сварки;

- использования жаропрочных и жаростойких сплавов с их дальнейшим эмалированием, позволяющих повысить надежность в 2–2,5 раза;

- использования способов снижения эмиссии NO_x путем: подвода воды или пара в зону горения; подмешивания продуктов сгорания к воздуху на входе в зону горения (рециркуляция); организации в камере двухстадийного горения с предварительным перемешиванием топливно-воздушных смесей;

4) для турбины авиационного двигателя:

- направленной кристаллизации для изготовления всех каналов и отверстий лопатки;

- ионно-плазменной технологии или технологии электронно-лучевого испарения в вакууме (на наружные поверхности деталей наносят плакирующее покрытие $MeCrAlY$, где $Me-Ni, Co, NiCo$), что обеспечивает повышение жаростойкости и коррозионной стойкости покрытия, увеличивает ресурс лопаток газотурбинного двигателя;

- лазерной сварки (из двух половин), что позволяет должным образом организовать охлаждение лопаток за счет оребрения внутренних поверхностей;

- нанесения керамического покрытия методом, состоящим из термического распыления, напыления и вакуумного осаждения (изделия, полученные данным способом, и указанного состава покрытия способны работать в условиях очень высоких температур);

- нанесения трехслойных теплозащитных покрытий (газотермическим способом наносят первый слой из сплава на основе никеля, методом шликерной технологии наносят второй слой, содержащий алюминий, и газотермическим способом наносят третий керамический слой; финишную обработку поверхности третьего керамического слоя проводят виброшлифованием и вакуумной термообработкой детали). В результате увеличивается ресурс работы

крупногабаритных деталей турбины авиационного двигателя;

- нанесения диффузионных защитных покрытий газовым циркуляционным методом;

5) для форсажной камеры газотурбинного двигателя:

- технологии измерения неконтактным методом интенсивности излучения в струе продуктов сгорания для повышения полноты сгорания углеводородного топлива в двухконтурных газотурбинных двигателях с форсажными камерами;

б) для реактивного сопла:

- технологии точного литья по выплавляемым моделям, что повышает надежность деталей реактивного сопла и увеличивает ресурс работы двигателя.

В приведенном обзоре данных патентной статистики в электронной базе данных (рис. 2) используются как известные (работающие патенты), так и новейшие разработки и конструкторские идеи по созданию авиационных двигателей, функционирующих на основе принципиально иных способов – это атомный газотурбинный и интеллектуальный двигатель.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложенный метод выбора высоких узловых технологий (наилучших технологических решений) с использованием средств искусственного интеллекта в среде MATLAB 6.5 позволяет наглядно и доступно реализовать задачу поиска «ядра решений» для создания современных газотурбинных двигателей или его узлов, что дает возможность конструктору и технологу применить представленные в патентах и научной литературе знания для определения наиболее прогрессивных решений в инновационном проекте создания и постановки на производство конкурентоспособных изделий.

В результате проведенного анализа известных промышленных образцов и полезных моделей по данным патентной статистики с использованием средств искусственного интеллекта и электронных баз данных патентной статистики можно строить многовариантные графы развития единых технологий, которые представляют собой совокупности «высоких узловых техноло-

гий» и прогрессивных базовых технологий. Полученный граф представляет собой ядро решений развития единых технологий.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Гражданский** кодекс РФ от 18.12.2006. № 230-ФЗ. Ч. 4.
2. **Павлинич, С. П.** Метод системного анализа инновационных проектов развития авиационной техники и технологий / С. П. Павлинич, С. Н. Поезжалова, С. Г. Селиванов // Вестник УГАТУ. 2008. Т. 10, №2(27). С. 3–11.
3. **Селиванов, С. Г.** Инноватика : учеб. для вузов / С. Г. Селиванов, М. Б. Гузаиров, А. А. Кутин. М. : Машиностроение, 2007. 721 с.
4. **Селиванов, С. Г.** Технологическая инноватика / С. Г. Селиванов М. : Наука, 2004. 283 с.
5. **Селиванов, С. Г.** Теоретические основы реконструкции машиностроительного производства / С. Г. Селиванов, М. В. Иванова. Уфа : Гилем, 2001. 312 с.

ОБ АВТОРАХ



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



Поезжалова Светлана Николаевна, дипл. бак. техн. и технол. (УГАТУ, 2007). Иссл. в обл. высоких и критических технологий машиностроения.