

УДК 629.7.004.7

**В. И. ВАСИЛЬЕВ, С. В. ЖЕРНАКОВ****КОНТРОЛЬ И ДИАГНОСТИКА  
ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ АВИАЦИОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ  
НА ОСНОВЕ ЭКСПЕРТНЫХ СИСТЕМ**

Рассматривается один из подходов к построению нечеткой экспертной системы для решения задач диагностики и контроля проточной части авиационных двигателей. Разработана инженерная методика, которая может быть применена на этапах испытаний и доводки авиационных двигателей. *Мониторинг; контроль; диагностика; нечеткая экспертная система*

**ВВЕДЕНИЕ**

Применение экспертных систем (ЭС) значительно повышает эффективность диагностирования авиационного газотурбинного двигателя (ГТД), так как позволяет оперативно анализировать разнообразную информацию по особенностям складывающейся ситуации, вырабатывать необходимые рекомендации о возможности устранения той или иной неисправности, учитывать нелинейности и неопределенный характер протекающих в них процессов и принимать оптимальные решения по эксплуатации данного двигателя.

Одним из перспективных способов повышения эффективности функционирования современных систем диагностики является внедрение новых информационных компьютерных технологий, основанных на «мягких» вычислениях: нечеткой логике (НЛ), нейронных сетях (НС), генетических алгоритмах (ГА), с адаптацией этих технологий в среде гибридных динамических ЭС, что позволяет им при равных вычислительных возможностях с обычными ЭС охватывать более широкий спектр решаемых задач.

ЭС диагностики соотносят наблюдаемые нарушения поведения системы с обусловившими их причинами, опираясь на один из двух следующих методов. Первый подразумевает использование некой таблицы ассоциативных связей между типами поведения систем и диагнозами [1–5]. Во втором методе совместное использование знаний о том, как устроена система, и знаний о слабых местах конструкции или используемых деталей позволяет строить предположения о неис-

правностях, совместимых с наблюдаемыми данными [2].

Вычислительная мощность ЭС определяется, в первую очередь, наращиваемой базой знаний (БЗ), в которой хранятся эталонные данные, описывающие рассматриваемую область, и правила, описывающие целесообразные преобразования данной области. Современные гибридные диагностические ЭС [2, 5] позволяют оперировать нечеткими определениями, позволяя более эффективно использовать и хранить полученные знания, облегчая процесс их приобретения, а система в целом становится более гибкой.

Мобильность ЭС обусловлена мобильностью БЗ и возможностью ее пополнения из разных информационных составляющих (баз данных (БД), баз экспертных знаний (БЭКЗ), баз концептуальных знаний (БКЗ), динамических файлов и т.д.), а также различными процедурами вывода. Конкретизация знаний при решении задач диагностики декомпозирует их на точные и неточные, полные и неполные, статические и динамические, однозначные и многозначные и т.д. Кроме того, сами экспертные знания неточны в силу их субъективного характера. Приблизительность и многозначность знаний приводят к тому, что ЭС имеет дело как бы не с одной, а с несколькими альтернативными областями. Поэтому неполнота знаний позволяет использовать не один, а несколько источников знаний, что особенно актуально при эксплуатации ГТД пятого-шестого поколений, которые требуют привлечения интеллектуальных систем, способных эффективно локализовать отказ, устранить неисправность, осуществить

настройку (регулировку) параметров и прогноз текущего состояния (ресурса) и т. д.

При создании ЭС диагностики и контроля параметров ГТД был учтен ряд особенностей, связанных:

- с исследуемым объектом (количество диагностируемых и контролируемых параметров, адаптация модели (точность, допущения), ошибки измерений);
- с архитектурой ЭС (взаимодействие информационных потоков, организация баз данных (БД) и знаний (БЗ) (баз концептуальных и экспертных знаний));
- с адаптацией «мягких» вычислений в среде ЭС и ее подсистем;
- с уровнем квалификации пользователя при решении поставленных им задач.

В основе идеологии разработанной экспертной системы мониторинга состояния ГТД лежит использование метода FDI (Fault Detection and Identification), основанного на сравнении результатов измерений газодинамических параметров реального ГТД с расчетными параметрами, вычисленными по его математической модели [6–9].

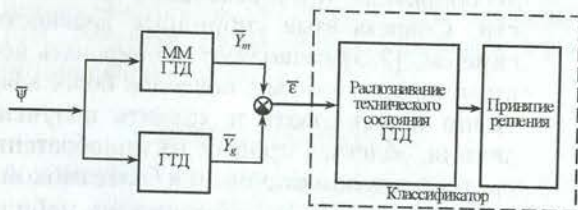


Рис. 1. Реализация FDI-метода

На рис. 1 показана типовая реализация FDI-метода, здесь:  $\bar{\psi}$  — вектор управляющих воздействий;  $\bar{Y}_m$  — вектор параметров, вычисленных с помощью математической модели ГТД, представляющей собой классическую аналитическую модель;  $\bar{Y}_g$  — вектор параметров, представляющий данные измерений, полученные с помощью датчиков;  $\bar{\varepsilon} = \bar{Y}_g - \bar{Y}_m$  — невязка, полученная в процессе покомпонентного сравнения векторов  $\bar{Y}_g$  и  $\bar{Y}_m$ .

В процессе реализации данного метода необходимо решить следующие задачи:

- разработка и программная реализация модели авиационного ГТД;
- вычисление рассогласования (связки) и распознавание технического состояния ГТД;
- принятие решения о техническом состоянии авиационного двигателя.

При этом процесс распознавания технического состояния и принятия на основании

этого соответствующего решения в совокупности выполняет функцию классификатора. Применение в нем элементов нечеткой логики [10, 11] позволяет последнему осуществлять разделение классов технического состояния авиационного ГТД в условиях неполноты измеряемой информации, а также с учетом конструктивной и параметрической неопределенности характеристик реального авиационного ГТД.

Данная экспертная система позволяет конечному пользователю решать задачи по их описанию и исходным данным без программирования процесса решения задачи (программирование осуществляется автоматически программой-планировщиком из набора готовых программных модулей, относящихся к данной предметной области (рис. 2)).

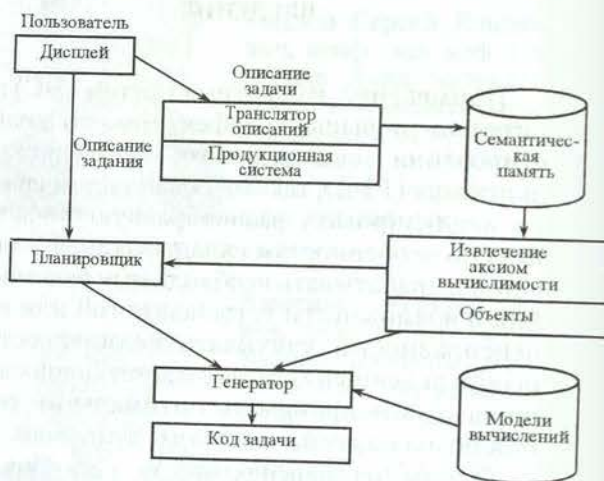


Рис. 2. Процесс решения задач в расчетно-логической ЭС С-PRIZ

Цепочка, реализующая вычислительный процесс задач пользователя в данной ЭС, выглядит следующим образом: спецификация → теорема → доказательство → алгоритм → результат задачи.

В этой экспертной системе от пользователя не требуется явного описания алгоритма решения задачи, ему просто необходимо, используя входной язык этой ЭС УТОПИСТ, описать на нем собственную задачу. При этом постановка задачи представлена в виде оператора, который является семантически правильным, если задача разрешима. Для семантически правильной задачи в системе синтезируется алгоритм на ассемблере в виде модуля решения. При выполнении программы, исходный текст которой содержит оператор задачи, происходит обращение к автоматически составленному модулю решения [12], который, в свою очередь, может содержать обра-

щение к другим автоматически вызываемым модулям, в качестве которых используются подпрограммы либо макроопределения.

Экспертная система C-PRIZ содержит четыре компонента, которые работают последовательно (рис. 2): транслятор переводит понятия в аксиомы, а рршасмыс задачи — в теоремы; синтезатор строит доказательство теорем; генератор извлекает из доказательства алгоритм; интерпретатор вычисляет результат. Все вычисления в данной экспертной системе производятся на уровне объектов.

Правила в этой экспертной системе имеют форму импликаций, и выражают факты и законы, по которым можно выводить новые факты и зависимости (строить описания, создавать объекты). Описания решаемой ЭС задачи запоминаются в семантической памяти [13]. Они могут задаваться непосредственно в условиях задачи или копироваться из семантической памяти, реализованной на основе иерархической файловой системы.

В математическом аспекте вычислительная модель в экспертной системе C-PRIZ может быть представлена:

$$W = \langle A, D, B, D_B, F, H \rangle,$$

где  $A$  — множество атрибутов;  $D$  — множество соответствующих им доменов; элементы  $B$  имеют вид  $X \rightarrow Y$ , где  $X$  и  $Y$  — некоторые подмножества  $A$ . Множеству  $B$  соответствует домен  $D_B$ , элементами которого выступают определенные программы с входными параметрами  $X$  и выходными параметрами  $Y$ . Эти программы при подстановке в  $X$  значений из  $D_i$  вычисляют значения  $D_j$  тех атрибутов, которые соответствуют  $Y$ . Совокупность  $F$  — множество описаний типов всех используемых в  $B$  функциональных зависимостей, а  $H$  задает совокупность отношений (предикатов) над множеством атрибутов  $A$ .

На основании данного представления вычислительных моделей разработан ряд компонентных математических моделей ГТД в среде экспертной системы C-PRIZ для решения задач контроля и диагностики ГТД. Отличительными особенностями данных моделей в сравнении с классическими подходами к их реализации являются:

- возможность динамического изменения структуры математической модели ГТД (ТРД, ТВД, ТВВД, ТРДД, ТРДДФ и т. д.);
- независимость математической модели от входных и выходных параметров;
- отсутствие этапов алгоритмизации и программирования;

- организация локальных вычислений по модели (вычисляются только те параметры, которые необходимы для процесса контроля и диагностики);

- возможность проведения на одной ММ прямых, обратных и смешанных расчетов, например, для экспресс-анализа технического состояния ГТД;

- возможность локализации отказа ГТД по схеме (узел — агрегат — элемент) на одной ММ;

- простота функционального расширения и наращивания ММ;

- инвариантность интерфейса пользователя при работе с ММ позволяют последней работать автономно или совместно с экспертной системой.

#### МЕТОДИКА НАПОЛНЕНИЯ БАЗ ЗНАНИЙ ЭКСПЕРТНОЙ СИСТЕМЫ C-PRIZ

Экспертная система C-PRIZ включает в свой состав следующие базы знаний: базы концептуальных знаний, базы экспертных знаний, базы знаний прецедентов. Каждая из перечисленных баз знаний функционирует как автономно, так и в комплексе (совместно).

Методика наполнения баз знаний экспертной системы C-PRIZ реализована в виде следующей последовательности шагов:

1. Адаптация FDI-метода в среде данных экспертных систем, для чего необходимо формализовать математическую модель двухвального двухконтурного ГТД для процесса контроля и диагностики его реального аналога в стендовых условиях.

2. Описание физических процессов, происходящих в реальном авиационном двигателе в виде трансцендентных алгебраических, дифференциальных уравнений, адекватно описывающих работу его узлов и агрегатов. Формирование компонентной вычислительной модели из отдельных понятий концептуальной базы знаний.

3. Запись экспериментальных компресорных характеристик в базу концептуальных знаний (в виде таблицы).

4. Адаптация методов контроля и диагностики в среде экспертных систем (метод диагностических матриц, метод уравнивания и т. д.).

5. Формирование правил принятия решений в виде продукций: Если ..., то ... на основе анализа типовых ситуаций в процессе контроля и диагностики ГТД, а также на

основе опыта экспертов (разработка экспертной базы знаний).

6. Хранение «среднего» по парку параметров ГТД в базе данных экспертной системы C-PRIZ.

7. Ведение мониторинга параметров реального ГТД в процессе стендовых испытаний (формирование временной базы данных испытаний, осуществление связи БД C-PRIZ в виде импорта-экспорта файлов).

8. Создание базы знаний прецедентов в виде известных решений (проверенных временем ситуаций) на основе продукций и графа причинно-следственных связей с возможностью вычислений по математической модели для привлечения дополнительной информации и статистики эксплуатации ГТД.

9. Разработка базы нечетких правил в среде концептуальной базы знаний для формирования лингвистических переменных (фаззификация) и осуществления нечеткого вывода в процессе принятия решения о техническом состоянии ГТД.

10. Тестирование разработанных баз знаний, ликвидация избыточности и противоречивости.

11. Отработка взаимодействия компонент экспертной системы и баз знаний в процессе решения практических задач контроля и диагностики ГТД.

В рамках данной методики решен широкий спектр задач контроля и диагностики ГТД.

#### ОСОБЕННОСТИ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ КОНТРОЛЯ И ДИАГНОСТИКИ ГТД С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ЭКСПЕРТНОЙ СИСТЕМЫ C-PRIZ

Алгоритм решения задач контроля и диагностики ГТД с использованием экспертной системы C-PRIZ включает в себя выполнение следующей последовательности шагов:

- формализация и адаптация компонентной семантической модели ГТД в среде базы концептуальных знаний C-PRIZ;
- формализация и адаптация метода диагностирования в среде экспертной системы;
- разработка интерфейса между БД испытаний и внутренней БД на основе импорта-экспорта файлов;
- разработка (наполнение) баз экспертных знаний путем решения «прямых» задач контроля и диагностики (построение причинно-следственных связей в виде продукций-правил);

- разработка (наполнение) баз экспертных знаний путем решения обратных задач контроля и диагностики (по следствию найти причину);

- разработка баз нечетких правил в среде баз концептуальных знаний;

- приведение векторов измеренных (на стенде) и расчетных (по модели) параметров к относительным единицам (нормировка);

- покомпонентное сравнение векторов измеренных и расчетных параметров ГТД (классификация его технического состояния);

- принятие решения (выработка рекомендаций) о дальнейшей эксплуатации ГТД.

Перечисленные выше этапы являются необходимыми для осуществления контроля и диагностики параметров ГТД в среде экспертной системы C-PRIZ. Вместе с тем необходимо отметить, что организующей компонентой данного процесса является планировщик, который совместно с решателем выполняет координирующие и вычислительные функции. При этом от пользователя требуется знание предметной области и наличие навыков решения задач контроля и диагностики авиационного двигателя.

Отличительной особенностью экспертной системы C-PRIZ, с точки зрения программной реализации, является то, что C-PRIZ функционирует под управлением ОС Windows (язык C++) и для полной ее инсталляции необходимо 16 МБ оперативной памяти персонального компьютера, а также не менее 1,5 МБ на винчестере.

Входным языком экспертной системы является язык УТОПИСТ [14–18], который в случае необходимости может расширяться функциями пользователя (программы-утилиты или программы на языке УТОПИСТ).

При реализации FDI-метода в среде экспертной системы можно использовать два подхода к адаптации математической модели авиационного двигателя в БЗ:

- а) математическая модель строго настраивается на среднестатистический по парку ГТД;
- б) математическая модель адаптируется в БЗ под индивидуальный авиационный двигатель (с учетом данных, характеризующих его паспортные значения).

И в том, и в другом случае необходим анализ значительных объемов априорной информации, связанной с испытаниями и эксплуа-

тацией подобных диагностируемых двигателей.

Настройка (подгонка коэффициентов) математической модели на индивидуальный ГТД предполагает использование метода уравнивания [19–22], суть которого заключается в минимизации связей между параметрами, вычисленными по математической модели и измеренными с ее физического аналога путем последовательных итераций (настройки коэффициентов поправок для всех измеряемых и вычисляемых величин).

Отметим некоторую последовательность шагов, характерных для адекватного представления среднестатистической математической модели авиационного двигателя в среде БЗ экспертной системы С-PRIZ:

1) результаты испытаний нескольких бездефектных двигателей из парка ГТД представляются для идентификации математической модели, полученной на основе теоретических описаний рабочего процесса в двигателе;

2) производится идентификация математической модели по результатам испытания ее физического аналога (варьируемые параметры при этом являются параметрами состояния);

3) полученные при идентификации по результатам испытаний ГТД значения параметров состояния рассматриваются как случайная выборка из генеральной совокупности (для каждого параметра состояния находится математическое ожидание, дисперсия и другие статистические оценки, анализ которых позволяет выявить грубые ошибки и оценить возможные границы изменения параметров состояния для бездефектного двигателя);

4) математические ожидания параметров состояния включаются в массив исходной информации для эталонной среднестатистической математической модели бездефектного ГТД;

5) производится классификация возможных дефектов для всех узлов двигателя по отдельности и определяются параметры состояния, изменяющиеся при появлении этих дефектов (так как различные неисправности могут приводить к изменению одного и того же параметра состояния, они объединяются в группы); для каждого из параметров намечаются границы, означающие появление того или иного дефекта;

6) на эталонной математической модели двигателя имитируются различные дефекты путем изменения параметров состояния

и рассчитываются соответствующие им признаки состояния (прямая задача);

7) для проверки полученных границ параметров состояния используются результаты испытаний нескольких ГТД с известными дефектами, делается заключение о достоверности границ и принимается решение о необходимости дополнительной проверки границ по результатам испытания других дефектных двигателей;

8) производится идентификация математической модели ГТД в рамках FDI-метода по результатам испытания диагностируемого двигателя, при этом входной информацией для идентификации являются признаки состояния, замеренные при испытаниях (данные из БД испытаний), а выходной информацией — параметры состояния (обратная задача); полученные значения параметров состояния сравниваются с граничными значениями этих параметров для бездефектного двигателя и в результате делается вывод о наличии соответствующих неисправностей.

Для повышения точности диагноза по среднестатистической математической модели можно использовать два подхода:

- во-первых, среднестатистическую модель можно заменить индивидуальной, т. е. для каждого экземпляра ГТД корректировать эталонную модель путем идентификации последней по результатам сдаточных испытаний (уточняются индивидуальные границы параметров состояния, которые будут более узкими, а следовательно, и более надежными);

- во-вторых, вместо постоянных границ параметров состояния можно использовать переменные, учитывающие дрейф этих границ с учетом износа и старения двигателя, применяя элементы нечеткой логики.

Компонентная математическая модель в расчетно-логической экспертной системе С-PRIZ в обобщенном виде может быть представлена:

$$Z_{\xi,k}^*(t) = P_{\xi,k} \left( \tilde{Z}_{\xi}(t), R_k, Q_k, S_k, T_k \right),$$

где  $Z_{\xi,k}^*(t)$  — вектор выходных параметров, вычисленных по компонентной математической модели ГТД;  $\tilde{Z}_{\xi}(t)$  — вектор входных воздействий, задающий режим работы ГТД,  $\xi = \overline{1, \varepsilon}$ ;  $R_k = \{r_1, r_2, \dots, r_k\}$  — множество компонент, входящих в состав математической модели ГТД и находящихся в концептуальной БЗ экспертных систем, характеризующих  $k$ -м сочетанием в обобщенной семантической сети,  $k = \overline{1, K}$ ;  $Q_k$  — опера-

тор преобразования вектора входных воздействий в вектор выходных параметров, рассчитываемых по вычислительной модели;  $S_k$  — уравнения связи для построения компонентной модели (определение связующих переменных отдельных компонент);  $T_k$  — длительность функционирования.

На рис. 3 показан процесс формирования (наполнения) баз данных дефектов, а также реализация FDI-метода в среде экспертной системы C-PRIZ. При этом в процессе формирования базы данных дефектов подразумевается, что пользователь предварительно «построил» сформированную им из отдельных понятий (компонент) в концептуальной БЗ математическую модель на средний по парку или индивидуальный ГТД. В процесс работы с данной компонентной математической моделью он на этапе ее адаптации в среде экспертных систем по известным входным параметрам формирует эталонный вектор данных, характеризующих бездефектное состояние последней. Эталонный вектор данных хранится во встроенной БД экспертных систем в виде «атрибут-значение». Далее решается «прямая» задача: по известному дефекту находятся отклонения от эталонного состояния. Для этого пользователем в компоненты математической модели вносятся характерные дефекты. Расчеты, проводимые им по математической модели с предварительно внесенными дефектами, формируют на ее выходе соответствующий вектор параметров, сравнение которого с эталонным дает вектор отклонений (факты), который в качестве статистического материала заполняет базу данных дефектов.

В дальнейшем в работе рассматриваются параметрические отказы в проточной части авиационного двигателя, парирование которых позволяет локализовать место проявления дефекта, предотвратив развитие чрезвычайной (катастрофической) ситуации, приводящей к поломкам и разрушениям ГТД.

Реализация FDI-метода в среде экспертной системы C-PRIZ (рис. 4) предполагает решение «обратной задачи»: по вектору отклонений на конкретном режиме работы ГТД осуществляется локализация дефекта с принятием соответствующего решения. Для этого данные из БД испытаний ГТД (входные параметры) подаются на вход компонентной математической модели, а затем вектора выходных параметров модели и данных со штатных датчиков на стенде (предварительно обработанных и записанных в БД испытаний) сравниваются. В результате получается вектор от-

клонений, анализ которого базой нечетких правил экспертных систем формирует соответствующее диагностическое решение о фактическом техническом состоянии авиационного двигателя с рекомендациями по его эксплуатации. Таким образом, математическая модель является дополнительным информационным каналом для передачи диагностической информации.

Экспертная система C-PRIZ осуществляет процесс диагностирования авиационного ГТД на основе нескольких методик, реализованных и адаптированных в ее среде.

Предложенный способ решения задач контроля и диагностики ГТД на основе FDI-метода предполагает, в отличие от существующих классических методов, использующих жесткие допуски на контролируемые и диагностируемые параметры, а также жесткие границы варьирования коэффициентов, увязывающих экспериментальные и расчетные данные на этапах локализации дефектов в ГТД, применять правила нечеткой логики, основанные на адаптации расчетной математической модели реальному ГТД с учетом конкретных внешних условий, а также знаний и опыта экспертов для принятия правильных решений о техническом состоянии двигателя. В данной работе элементы нечеткой логики предлагается применять совместно с такими классическими методами, как [5, 6, 19–25]:

- метод диагностических матриц (матриц Л. А. Урбана);
- варьирование коэффициентов параметров состояния двигателя с целью минимизации невязок между измеренными и расчетными параметрами ГТД.

Приведенный ниже пример иллюстрирует особенности применения предложенного подхода, учитывая качественные изменения, происходящие в ГТД, например, деградацию его характеристик.

Задачи семантической визуализации, а также реконфигурации математической модели (обратное доказательство теорем, автоматический синтез программ) в среде C-PRIZ решаются на основе математической модели двухвального двухконтурного ГТД.

Математическая модель диагностируемого авиационного двигателя настроена на индивидуальный ГТД с учетом рассеивания параметров компрессорных характеристик. В среде C-PRIZ, данная задача решалась в два этапа:

- прямая задача, для решения которой была использована статистика характерных де-

фектов, проявившихся в процессе эксплуатации данного ГТД, а также подобная статистика, полученная на адекватной математической модели (рис. 3);

- обратная задача, решение которой позволяет по результирующему вектору отклонений (покомпонентно сравнение параметров математической модели и измеренных данных со штатных датчиков) принять решение о фактическом техническом состоянии ГТД (рис. 4).

Для решения задачи локализации неисправных модулей проточной части ГТД используется метод диагностических матриц [5, 6, 19–25], устанавливающий связи между отклонениями измеряемых термодинамических параметров рабочего процесса и отклонениями расчетных конструктивных параметров состояния узлов двигателя.

Такие модели могут быть заданы в векторной форме в виде

$$\vec{\delta x} = A^{-1} \cdot B \cdot \vec{\delta y},$$

где  $\vec{\delta x}$  — вектор параметров состояния двигателя;  $\vec{\delta y}$  — вектор диагностических признаков, относительных отклонений измеряемых параметров ГТД;  $B$  и  $A$  — матрицы коэффициентов, позволяющие устанавливать количественную взаимосвязь указанных параметров на определенных режимах работы двигателя. Диагностическая матрица конкретного двигателя на определенном режиме представляет собой таблицу численных значений коэффициентов  $a_{ij}$  и  $b_{ij}$ , позволяющих по отклонениям ряда измеряемых параметров  $\delta y_{ij}$  определять отклонения неизмеряемых параметров состояния отдельных узлов  $\delta x_{ij}$ .



Рис. 3. Процесс формирования базы данных дефектов

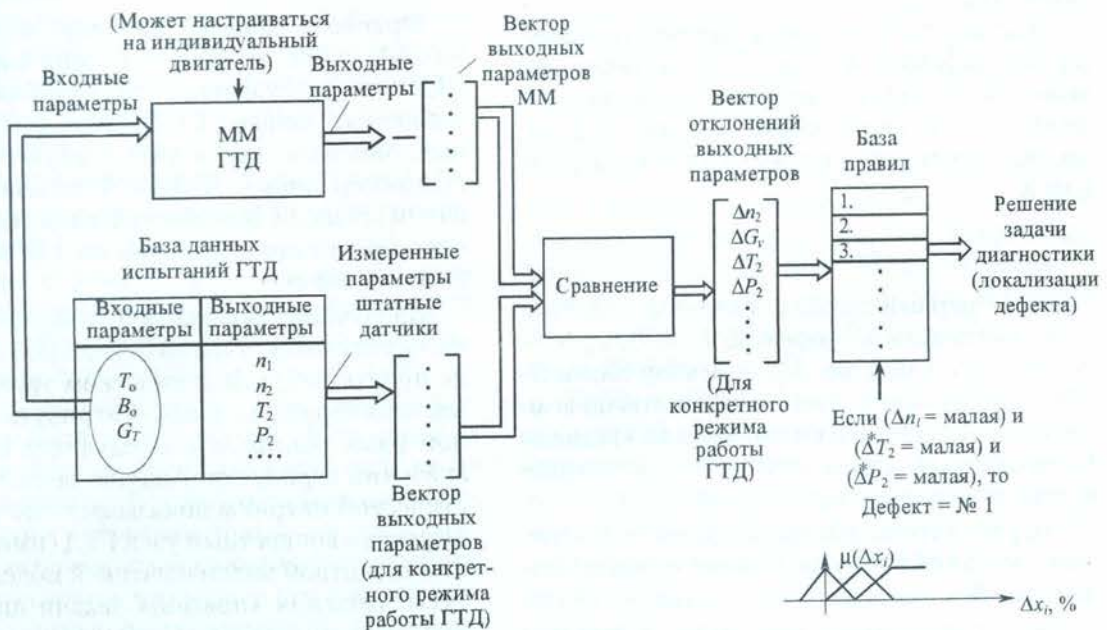


Рис. 4. Реализация FDI-метода в среде экспертной системы С-PRIZ с принятием решения на основе нечеткой логики

Таблица 1

Фрагмент диагностической матрицы двухконтурного ГТД

№	$D_{N_2}$	$D_{G_V}$	$D_{T_2}$	$D_{P_2}$	$D_{T_3}$	$D_{T_4}$	$D_{P_4}$	$D_{P_6}$	$D_{F_C}$	$D_{G_t}$	$D_R$	RESULT
1	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	ETALON
2	-0,19	0,11	0,17	0,13	0,00	-0,09	-0,32	-0,32	0,39	-0,04	-0,07	PIKND1%
3	-0,48	0,33	0,52	0,39	0,00	-0,27	-0,93	-0,93	1,11	-0,11	-0,18	PIKND3%
4	-0,68	0,55	0,87	0,65	0,00	-0,46	-1,57	-1,57	1,87	-0,19	-0,31	PIKND5%
5	0,19	0,07	-0,30	0,06	0,00	0,16	0,82	0,82	-0,66	0,33	0,49	KPDKND1%
6	0,78	0,24	-0,93	0,18	0,00	0,49	2,53	2,53	-2,08	1,03	1,54	KPDKND3%
7	1,16	0,39	-1,61	0,27	0,00	0,85	4,27	4,28	-3,60	1,76	2,62	KPDKND5%
8	-0,10	0,84	0,13	0,85	0,00	-0,07	0,53	0,53	0,28	0,72	1,02	GVND1%
9	-0,29	2,46	0,36	2,49	0,00	-0,19	1,60	1,60	0,79	2,16	3,01	GVND3%
10	-4,28	6,80	2,16	5,10	0,00	-1,16	-0,11	-0,14	4,55	3,21	5,14	GVND5%
11	-0,78	-0,06	0,05	-0,06	0,00	-0,03	-0,18	-0,18	0,11	-0,10	-0,15	PIKVD1%
12	-2,33	-0,21	0,15	-0,18	0,00	-0,08	-0,53	-0,53	0,30	-0,34	-0,47	PIKVD3%
13	-4,07	-0,37	0,25	-0,32	0,00	-0,13	-0,96	-1,00	0,55	-0,59	-0,84	PIKVD5%
14	0,68	0,21	-0,12	0,25	0,00	0,06	0,53	0,53	-0,28	0,31	0,46	KPDKVD1%
15	2,04	1,20	-0,41	0,58	0,00	0,21	1,64	1,64	-0,92	0,95	1,38	KPDKVD3%
16	3,39	1,46	-0,70	0,97	0,00	0,37	2,70	2,71	-1,55	1,60	2,32	KPDKVD5%

Пусть в процессе контроля технического состояния ГТД с программой регулирования ( $n_1 = \text{const}$ ,  $F_C = \text{const}$ ) были замерены следующие параметры:  $n_2$  — частота вращения ротора компрессора высокого давления (%);  $G_V$  — расход воздуха (кг/с);  $T_2^*$  — температура воздуха за компрессором (К);  $P_2^*$  — давление воздуха за компрессором (Па);  $T_3^*$  — температура газов на выходе из камеры сгорания (К);  $T_4^*$  — температура газов за турбиной (К);  $P_4^*$  — давление газов за турбиной (Па);  $F_C$  — площадь соплового аппарата (см);  $G_t$  — расход топлива (кг/ч);  $R$  — тяга, развиваемая двигателем (Н).

Анализ статистических данных о характерных дефектах в узлах ГТД, а также дополнение их путем имитации (внесением дефекта) на математической модели ГТД позволили построить диагностическую матрицу в виде

$$D_{\gamma_i} = \bar{M}_p,$$

где  $\gamma_i$  — первый столбец матрицы, содержащий имитируемые дефекты;  $i = 1, \dots, N$  — количество дефектов;  $\bar{M}_p$  — вектор параметров, полученный в процессе расчетов по компонентной математической модели (реакция на проявление дефекта);  $p = 1, \dots, K$  — количество измеряемых параметров.

Первая строка данной матрицы — эталонное состояние ГТД, содержащее нулевые элементы. Все последующие строки — отклонения от эталонного состояния вследствие проявления дефекта. Всего было рассмотре-

но 15 различных дефектов на максимальном режиме работы авиационного двигателя. Имитация каждого дефекта на математической модели была обусловлена изменением внутреннего параметра ГТД в диапазоне от 1 до 5 %.

Обратная диагностическая матрица была получена путем преобразования диагностической матрицы к виду:

$$\bar{M}_p = D_{\gamma_i}.$$

Фрагмент данной матрицы приведен в табл. 1. Здесь  $D_{\gamma_i}$  — значения параметров ГТД, соответствующие отклонениям от их эталонных данных; RESULT — столбец данных, описывающих определенную ситуацию. Например, запись PIKND3% означает уменьшение степени повышения давления в компрессоре низкого давления на 3 % от эталонного значения.

Адаптация диагностической матрицы в экспертную базу знаний осуществляется в виде продукции, а на логическом уровне самая верхняя строка матрицы — атрибуты экспертной базы знаний, а последующие строки — значения атрибутов. Анализ данной диагностической матрицы показывает, что внесение дефекта в конкретный узел ГТД (имитация на компонентной математической модели в процессе решения «прямой» задачи диагностики), приводит к существенному изменению нескольких параметров в строке.



Таблица 2

## Формирование базы нечетких правил на основе диагностической матрицы

$D_{N_2}$	$D_{G_V}$	$D_{T_2}$	$D_{P_2}$	$D_{T_3}$	$D_{T_4}$	$D_{P_4}$	$D_{P_5}$	$D_{F_C}$	$D_{G_t}$	$D_R$	REZULT
0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	ETALON
-	+	+	+	-	-	-	-	+	-	-	PiKND1%
-	+	+	+	-	-	-	-	+	-	-	PiKND3%
-	+	+⊗	+	-	-	-⊗	-⊗	+⊗	-	-	PiKND5%
+	+	-	+	-	+	+	+	+	+	+	KPDKND1%
+	+	-	+	-	+	+	+	+	+	+	KPDKND3%
+⊗	+	-⊗	+	-	+	+	+	+⊗	+⊗	+	KPDKND5%
-	+	+	+	-	-	-	-	+	+	+	GVND1%
-	+	+	+	-	-	-	-	+	+	+	GVND3%
-⊗	+	+⊗	+⊗	-	-	-	-	+	+	+⊗	GVND5%
-	-	+	-	-	-	-	-	+	-	-	PiKVD1%
-	-	+	-	-	-	-	-	+	-	-	PiKVD3%
-⊗	-⊗	+	-⊗	-	-	-	-	+	-	-⊗	PiKVD5%
+	+	-	+	-	+	+	+	-	+	+	KPDKVD1%
+	+	-	+	-	+	+	+	-	+	+	KPDKVD3%
+⊗	+⊗	-⊗	+	-	+	+	+	-	+	+⊗	KPDKVD5%
+	+	+	+	-	+	+	+	+	+	-	GVVD1%
+	+	+	+	-	+	+	+	+	+	-	GVVD3%
+	+	+⊗	+⊗	-	+⊗	+	+	+	+⊗	-	GVVD5%
-	-	-	-	-	-	-	-	+	-	-	Fkr_c1%
-	-	-	-	-	-	-	-	+	-	-	Fkr_c3%
-⊗	-	-	-	-	-⊗	-	-	+	-⊗	-⊗	Fkr_c5%

Проводя построчную оценку изменения параметров двигателя на возникновение в нем того или иного дефекта, можно построить таблицу, с одной стороны, характеризующую изменение поведения каждого отдельно взятого параметра, а с другой — минимизирующей количество штатных датчиков (выделяются наиболее существенные) (табл. 2). Знак минус в строчках матрицы показывает тенденцию к уменьшению значения измеряемого параметра, а знак плюс — к его увеличению. Помеченные знаком ⊗ строчки показывают существенное отклонение измеряемых параметров.

Данные строки легли в основу создания базы экспертных знаний, которая формируется на основе табл. 3 и функций принадлежности соответствующих лингвистических переменных, например, (рис. 5, 6). Таким образом, база экспертных знаний (база правил) на логическом уровне будет иметь вид, показанный в табл. 3. В этом состоянии экспертная система «обучена» только на распознавание фактического технического состояния ГТД при условии, что вектор отклонений выходных параметров авиационного двигателя содержит невязки, соответствующие 5 % из-

менению параметров узлов. В табл. 3 приведен лишь фрагмент базы экспертных знаний, соответствующий процессу принятия решения о техническом состоянии ГТД. Процессу решения задачи соответствует несколько подобных фрагментов таблиц (сценариев), выполняющих определенные функции: загрузка модели, подключение БД, запись рассчитанных по модели данных в файл БД, сравнительный анализ измеренного и расчетного файлов данных и т. д.

В табл. 3 приведены параметры отклонений (невязок) и соответствующие им лингвистические переменные: *LN* (Large Negative) — очень малое; *MN* (Middle Negative) — небольшое; *Z* (Zero) — около нуля; *MP* (Middle Positive) — среднее; *LP* (Large Positive) — очень большое.

Процесс тестирования работоспособности экспертной системы будем проверять по тем строчкам базы правил (табл. 3), которые не вошли в обучающее множество: по двум предшествующим строчкам (с отклонением параметров состояния ГТД в узлах на 1 и 3 % соответственно).

Фрагмент базы нечетких экспертных правил

№	Атрибуты и их значения	Результат
1	Если $(\Delta T_2 = Z) \wedge (\Delta P_4 = Z) \wedge (\Delta P_6 = Z) \wedge (\Delta F_c = MP)$	то $Y_1 = PIKND$
2	Если $(\Delta N_2 = Z) \wedge (\Delta T_2 = Z) \wedge (\Delta F_c = MN) \wedge (\Delta G_t = MP)$	то $Y_2 = KPDKND$
3	Если $(\Delta N_2 = LN) \wedge (\Delta T_2 = Z) \wedge (\Delta P_2 = LP) \wedge (\Delta R = LP)$	то $Y_3 = GVND$
4	Если $(\Delta N_2 = LN) \wedge (\Delta G_v = Z) \wedge (\Delta P_2 = Z) \wedge (\Delta R = Z)$	то $Y_4 = PIKVD$
5	Если $(\Delta N_2 = MP) \wedge (\Delta G_v = Z) \wedge (\Delta T_2 = Z) \wedge (\Delta R = MP)$	то $Y_5 = KPDKVD$
6	Если $(\Delta T_2 = Z) \wedge (\Delta P_2 = Z) \wedge (\Delta T_4 = Z) \wedge (\Delta G_t = Z)$	то $Y_6 = GVVD$
7	Если $(\Delta N_2 = MN) \wedge (\Delta T_4 = LN) \wedge (\Delta G_t = LN) \wedge (\Delta R = LN)$	то $Y_7 = FKR$
8	Если $(\Delta P_4 = Z) \wedge (\Delta P_6 = Z) \wedge (\Delta P_2 = Z) \wedge (\Delta G_t = MN)$	то $Y_8 = KPDMVD$
9	Если $(\Delta T_4 = Z) \wedge (\Delta P_4 = Z) \wedge (\Delta P_6 = Z) \wedge (\Delta R = Z)$	то $Y_9 = KPDMND$
10	Если $(\Delta N_2 = MP) \wedge (\Delta G_v = Z) \wedge (\Delta G_t = Z) \wedge (\Delta R = Z)$	то $Y_{10} = KPDTVD$
11	Если $(\Delta P_2 = MN) \wedge (\Delta P_4 = Z) \wedge (\Delta G_t = MP) \wedge (\Delta F_c = MN)$	то $Y_{11} = SIGKC$
12	Если $(\Delta P_2 = MN) \wedge (\Delta P_4 = MN) \wedge (\Delta F_c = LN) \wedge (\Delta G_t = MN)$	то $Y_{12} = SIGSOP$

Пусть в процессе сравнительного анализа измеренных с ГТД и вычисленных по адекватной ему математической модели параметров получен вектор невязок — четвертая строка сверху табл. 3, тогда анализ функций принадлежности лингвистических переменных, входящих в данную строку (рис. 5, 6), позволяет экспертной системе вычислить следующие значения функций принадлежности:

низкого давления) можно найти:

$$\begin{aligned} \mu_Z(\Delta T_2^{(k)}) &= 0,95; & \mu_{MN}(\Delta T_2^{(k)}) &= 0,05; \\ \mu_Z(\Delta P_4^{(k)}) &= 0,875; & \mu_{MN}(\Delta P_4^{(k)}) &= 0,0875; \\ \mu_Z(\Delta P_6^{(k)}) &= 0,925; & \mu_{MN}(\Delta P_6^{(k)}) &= 0,075; \\ \mu_Z(\Delta F_C^{(k)}) &= 0,84; & \mu_{MN}(\Delta F_C^{(k)}) &= 0,1. \end{aligned}$$

Используя базу нечетких правил экспертной системы, а также операцию пересечения нечетких множеств, получаем:

$$\min \left( \mu_Z(\Delta T_2^{(k)}) \& \mu_Z(\Delta P_4^{(k)}) \& \mu_Z(\Delta P_6^{(k)}) \& \mu_Z(\Delta F_C^{(k)}) \right) \rightarrow 0,84.$$

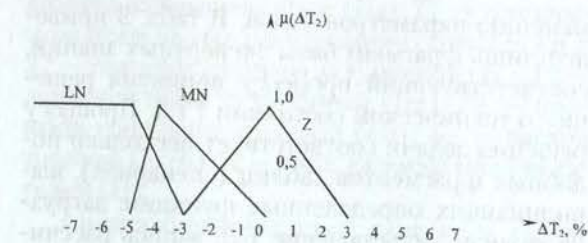
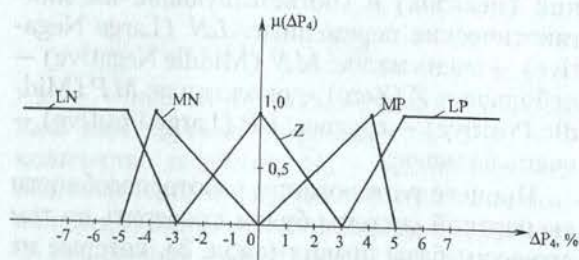
Это означает, что достоверность принятия решения (коэффициент уверенности) об исправности компрессора низкого давления составляет 0,84. По аналогии можно записать:

$$\min \left( \mu_{MN}(\Delta T_2^{(k)}) \& \mu_{MN}(\Delta P_4^{(k)}) \& \mu_{MN}(\Delta P_6^{(k)}) \& \mu_{MN}(\Delta F_C^{(k)}) \right) \rightarrow 0,05,$$

т. е. достоверность принятия решения о неисправности компрессора низкого давления составляет 0,05.

Для третьей строки, соответствующей 3 % понижению степени повышения давления в компрессоре низкого давления, имеем:

$$\begin{aligned} \mu_Z(\Delta T_2^{(k)}) &= 0,86; & \mu_Z(\Delta P_4^{(k)}) &= 0,7; \\ \mu_{MN}(\Delta P_4^{(k)}) &= 0,24; & \mu_Z(\Delta P_6^{(k)}) &= 0,7; \\ \mu_{MN}(\Delta P_6^{(k)}) &= 0,24; & \mu_Z(\Delta F_C^{(k)}) &= 0,59; \\ \mu_{MP}(\Delta F_C^{(k)}) &= 0,29. \end{aligned}$$

Рис. 5. Функции принадлежности лингвистической переменной  $\Delta T_2$ Рис. 6. Функции принадлежности лингвистической переменной  $\Delta P_4$ 

Для второй строки (1%-е отклонение степени повышения давления в компрессоре

Рассуждая по аналогии, приведенной выше, имеем:

$$\min(\mu_{Z_{\Sigma_i}}) \rightarrow 0,59.$$

Это означает, что достоверность принятия решения об исправности компрессора низкого давления составляет 0,59, а для его неисправного состояния коэффициент доверия будет 0,24.

Данные величины говорят о том, что есть высокая вероятность наличия дефекта в компрессоре низкого давления (КНД), что может соответствовать конструктивному дефекту, обусловленному снижением зазора в КНД по сравнению с заданным значением, соответствующим техническим условиям, что, в свою очередь, снизило степень повышения давления в КНД на 3%. Результаты анализа экспертной системы совпадают с результатами исследований, проведенных в ходе стендовых испытаний снятого с эксплуатации ГТД.



Рис. 7. Принятие решений диагностической ЭС С-PRIZ

Логика процесса принятия решений в ЭС С-PRIZ о техническом состоянии ГТД показана на рис. 7. Вектор отклонений (строка диагностической матрицы) (табл. 1) обрабатывается базой экспертных знаний, образующей систему правил (продукций), позволяющих вычислить уровни активности правил  $\alpha_i$  в соответствии с их значениями и шкалой значимости результатов принятия решений по каждому из правил.

Так, для первой строки табл. 1 и табл. 2 имеем уровень активности правила  $\alpha_1$ , для которого в соответствии с исправным состоянием ГТД (а) максимальное значение степени уверенности равно 1 и оно характеризует

годный ГТД, а минимальное значение (нуль) соответствует негодному двигателю. Промежуточные значения степени уверенности при постановке диагноза могут означать, например, что двигатель «практически не годен» ( $\alpha_1=0,3$ ) или «практически годен» ( $\alpha_1=0,7$ ).

Четвертая строка табл. 1 и табл. 2 соответствуют уровню активности правила  $\alpha_4$  и диагнозу «дефект в узле компрессора». Максимальное значение  $\alpha_4=1$  и в данном случае характеризует «существенный дефект», соответствующий уменьшению на 5% степени повышения давления в компрессоре  $\delta p_k^* = -5\%$ , а минимальное значение  $\alpha_4=0$  означает, что данный дефект отсутствует. Промежуточные значения  $\alpha_4$  могут означать, например, что дефект в компрессоре низкого давления соответствует уменьшению степени повышения давления в компрессоре на 1% ( $\alpha_4=0,3$ ) или на 3% ( $\alpha_4=0,7$ ).

Данный пример убедительно показывает, что диагностическая экспертная система на базе С-PRIZ легко выявляет наличие отказов в ГТД. Наиболее сложной задачей, решаемой диагностической экспертной системой, является выявление и локализация предотказного состояния развития скрытых дефектов в прочной части двигателя.

В заключение приведем методику построения решающих правил в базах знаний диагностической экспертной системы С-PRIZ:

- 1) Выделение характерных классов состояний ГТД.
- 2) Выделение центров классов.
- 3) Определение формы функции принадлежности для диагностической модели ГТД в рамках FDI-метода.

## ВЫВОДЫ

1. Поставлена и решена задача создания интеллектуальных систем мониторинга технического состояния ГТД с использованием реконфигурируемой математической модели авиационного двигателя и организации контроля на основе метода диагностических матриц и правил четкой логики.

2. Предложен метод построения математической модели ГТД на основе расширенной семантической сети, что позволяет путем реконфигурации математической модели и адаптации ее характеристик к индивидуальному двигателю решать широкий набор задач контроля и диагностики технического состояния ГТД.

3. Предложен алгоритм контроля и диагностики технического состояния ГТД на основе модифицированного метода диагностических матриц и правил нечеткой логики, применение которого позволяет эффективно и качественно осуществлять мониторинг технического состояния авиационного двигателя.

4. Рассмотрены особенности реализации этих методов и алгоритмов для решения задач контроля и диагностики технического состояния ГТД в составе разработанного автором исследовательского прототипа экспертной системы на базе C-PRIZ.

5. Разработана инженерная методика реализации рассмотренных методов и алгоритмов для создания гибридных баз знаний разработанного исследовательского прототипа экспертной системы мониторинга технического состояния ГТД.

6. Показано, что применение экспертной системы контроля и диагностики технического состояния авиационных двигателей позволяет:

- проводить контроль и диагностирование технического состояния ГТД при ограниченном объеме исходной информации;
- обнаружить и локализовать дефекты проточной части двигателя с точностью до узла;
- оценить фактическое отклонение параметров двигателя от расчетных, обусловленных погрешностью изготовления и деформацией элементов проточной части в процессе наработки;
- повысить информативность и сократить общее время контроля диагностики в 2–3 раза за счет использования индивидуальной настраиваемой модели авиационного двигателя и расширенной экспертной базы знаний о характеристиках ГТД.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Гаврилова, Т. А.** Базы знаний интеллектуальных систем / Т. А. Гаврилова, В. Ф. Хорошевский. С.-Пб.: Питер, 2000. 384 с.
2. **Алексеев, А. В.** Интеллектуальные системы принятия проектных решений / А. В. Алексеев, А. Н. Борисов, Э. Р. Вилломс. Рига: Зинатне, 1997. 320 с.
3. **Васильев, В. И.** Экспертные системы: Управление эксплуатацией сложных технических объектов / В. И. Васильев, С. В. Жернаков. Уфа: УГАТУ, 2003. 106 с.
4. **Борисов, А. Н.** Обработка нечеткой информации в системах принятия решений / А. Н. Борисов, А. В. Алексеев, Г. В. Меркурьева. М.: Радио и связь, 1989. 304 с.
5. **Ахмедзянов, А. М.** Диагностика состояния ВРД по термогазодинамическим параметрам / А. М. Ахмедзянов, Н. Г. Дубравский, А. П. Тунаков. М.: Машиностроение, 1983. 206 с.
6. **Дубравский, Н. Г.** Структура и алгоритмы системы диагностики двигателей по функциональным параметрам / Н. Г. Дубравский, И. В. Егоров, О. К. Знаменков. М.: ЦИАМ, 1984, № 10261. 156 с.
7. **Епифанов, С. В.** Синтез систем управления и диагностирования газотурбинных двигателей / С. В. Епифанов, Б. И. Кузнецов, И. П. Богаченко. Киев: Техника, 1998. 312 с.
8. **Frank, M. P.** Current developments in the theory of FDI / M. P. Frank, S. X. Ding // Preprints of the 4th IFAC Symposium on Fault Detection Supervision and Safety for Technical Processes. Budapest, 14–16 June, 2000. Vol. 1. P. 16–27.
9. **Iserman, R.** Process fault detection and diagnosis methods / R. Iserman // IFAC Symp. SAFE PROCESS'94. Helsinki, Finland. Vol. 2. P. 597–612.
10. **Тэрано, Т.** Прикладные нечеткие системы / Т. Тэрано, К. Асан, М. Сугэно. М.: Мир, 1993. 368 с.
11. **Васильев, В. И.** Интеллектуальные системы управления с использованием нечеткой логики / В. И. Васильев, Б. Г. Ильясов. Уфа: УГАТУ, 1995. 80 с.
12. **Тыгу, Э. Х.** Концептуальное программирование / Э. Х. Тыгу. М.: Наука, 1984. 236 с.
13. **Соломатин, Н. Н.** Информационные семантические системы / Н. Н. Соломатин. М.: Высшая школа, 1989. 127 с.
14. **Kotkas, V.** Ontology based design of surveillance systems with NUT / V. Kotkas, J. Penjam, E. Tyugu // 15th IFIP World Computer Congress. Wien, 1998. P. 1–5.
15. **Tyugu, E.** Using classes specifications for automatic construction of programs in the NUT system / E. Tyugu // Communications of the ACM. 1998. V. 34. P. 46–59.
16. **Tyugu, E.** Visual programming in NUT / E. Tyugu, R. Valt // Journal of Visual Languages and Computing. 1997. V. 8. P. 523–544.
17. **Uustalu, T.** The NUT Language Report / T. Uustalu, U. Kopra, M. Matskin, E. Tyugu. The Royal Institute of Technology (KTH), TRITA-IT//R 94: 14, KTH, March, 1999. 125 p.
18. **Vlasov, V.** NUTS: A distributed object-oriented platform with high-level communication functions / V. Vlasov, M. Addibpaur, E. Tyugu // Computers and Artificial Intelligence. 1998. V. 17, No. 4. P. 305–335.
19. **Дегтярев, Ю. Д.** Сравнение методов идентификации математических моделей ГТД / Ю. Д. Дегтярев, Х. С. Гумеров, Л. Х. Юлдыбаев // Испытания авиационных двигателей. Уфа: УАИ, 1981. № 9. С. 98–104.

20. **Черкез, А. Я.** Инженерные расчеты газотурбинных двигателей методом малых отклонений / А. Я. Черкез. М. : Машиностроение, 1975. 380 с.
21. **Чуян, Р. К.** Методы математического моделирования двигателей летательных аппаратов / Р. К. Чуян. М. : Машиностроение, 1988. 288 с.
22. **Боровик, В. О.** Анализ результатов испытаний ГТД с использованием математических моделей и методов математической статистики / В. О. Боровик, Е. М. Таран // Испытания авиационных двигателей. Уфа : УГАТУ, 1978. № 6. С. 3–12.
23. **Ладыгин, С. Ф.** Эффективность методов уравнивания в задачах идентификации параметров математических моделей ГТД / С. Ф. Ладыгин // Испытания авиационных двигателей. Уфа : УАИ, 1985. № 13. С. 31–41.
24. **Таран, Е. М.** Универсальный метод согласования математической модели ГТД с результатами испытаний / Е. М. Таран // Испытания авиационных двигателей. Уфа : УАИ, 1986. № 14. С. 63–70.
25. **Гишваров, А. С.** Математическое моделирование рабочих процессов газотурбинных энергетических установок / А. С. Гишваров, И. В. Приб, В. С. Жернаков // Труды АН

Республики Башкортостан. Отделение технических наук. Уфа : АН РБ, 2002. С. 212–229.

#### ОБ АВТОРАХ



**Васильев Владимир Иванович**, проф., зав. каф. выч. техники и защиты информации. Дипл. инж. по промэлектронике (УГАТУ, 1970). Д-р техн. наук по системн. анализу и автоматич. управлению (ЦИАМ, 1990). Иссл. в обл. многосвязных, многофункциональных и интеллектуальных систем.



**Жернаков Сергей Владимирович**, проф. каф. выч. техники и защиты информации. Дипл. инж. по промэлектронике (УГАТУ, 1984). Д-р техн. наук по сист. анализу, управлению и обр. информации (УГАТУ, 2005). Иссл. в обл. интел. систем.