

С. В. Жернаков, Р. Ф. Равилов

## КОНТРОЛЬ И ДИАГНОСТИКА ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ АВИАЦИОННОГО ДВИГАТЕЛЯ НА ОСНОВЕ ЭКСПЕРТНОЙ СИСТЕМЫ C-PRIZ

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

Газотурбинный двигатель (ГТД) как восстанавливаемый объект в течение срока службы требует постоянного мониторинга, трудоемкость которого зависит от уровня автоматизации процессов получения, обработки, хранения, документирования информации о текущем состоянии авиационного двигателя, а также контроля, диагностики, прогнозирования его технического состояния, последовательность и методы выполнения которых определяют информационную технологию мониторинга (ИТМ). Средством их реализации являются распределенные системы мониторинга, на которые возлагается задача определения степени соответствия объекта мониторинга предъявляемым требованиям, то есть контроля его технического состояния.

Распределенная система мониторинга является логическим дополнением ИТМ, так как совместно с последней осуществляет анализ фактического технического состояния ГТД: прогнозирование остаточного ресурса, отслеживает деградацию рабочих характеристик авиационного двигателя, определяет программу ремонтно-восстановительных работ и т. д.

Вместе с тем, несмотря на значительный объем исследований в данных областях, информационные технологии мониторинга технического состояния ГТД не являются совершенными по ряду причин, основными из которых являются, с одной стороны, разобщенность баз данных испытаний, контроля и диагностики, отсутствие интеллектуальных компонентов, позволяющих качественно и эффективно осуществ-

лять поддержку принятия ответственных решений и, как следствие, сокращать общее время, затрачиваемое на обслуживание ГТД; с другой стороны, нестационарность физических процессов в авиационном двигателе, сложность его математического описания, зависимость технических характеристик двигателя от внешних условий работы, ограниченный состав измеряемых термогазодинамических параметров двигателя, их технологический разброс и т. д. Указанные факторы приводят к необходимости принятия решений о техническом состоянии двигателя в условиях существенной неопределенности.

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

При реализации FDI-метода (Fault Detection and Identification), основанного на сравнении результатов измерений газодинамических параметров реального ГТД с расчетными параметрами, вычисленными по его математической модели [1–6], в среде экспертной системы можно использовать два подхода к адаптации математической модели авиационного двигателя в базе знаний (БЗ):

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

Настройка (подгонка коэффициентов) математической модели на индивидуальный ГТД предполагает использование метода уравнивания [1, 3], суть которого заключается в минимизации невязок между параметрами, вычислен-

Контактная информация: 8-917-748-03-99

Результаты научных исследований поддержаны грантами РФФИ: № 11-08-00871-а, 12-08-01014-а

ными по математической модели и измеренными с ее физического аналога, путем последовательных итераций (настройки коэффициентов поправок для всех измеряемых и вычисляемых величин).

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 и его подсистем 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.

Критерии эффективности идентификации среднестатистической математической модели ГТД в среде экспертной системы могут быть представлены в виде [1, 3, 4]:

$$\begin{aligned} \delta_p &= \frac{1}{mz} \sum_{ij}^{mz} (P_{I_j} - P_{M_i})^2; \\ \delta_x &= \frac{1}{nz} \sum_{ij}^{nz} (x_{g_i} - x_{M_{ij}})^2, \end{aligned} \quad (1)$$

где  $P_{I_j}, P_{M_i}$  – соответственно измеренные при испытаниях и рассчитанные по адекватной математической модели значения параметров проточной части ГТД;  $x_{g_i}, x_{M_{ij}}$  – действительные и рассчитанные по математической модели значения характеристик узлов ГТД (варьируемые параметры модели);  $I = \overline{1, m}$ , где  $m$  – число измеряемых при испытаниях параметров ГТД;  $i = \overline{1, n}$ , где  $n$  – число варьируемых параметров математической модели;  $j = \overline{1, z}$ , где  $z$  – число повторных измерений параметров ГТД.

Критерий  $\delta_p$  характеризует точность вычисления параметров ГТД среднестатистической моделью в сравнении с аналогичными параметрами, полученными в процессе стендовых испытаний, а критерий  $\delta_x$  – точность определения значений характеристик узлов ГТД.

Компонентная математическая модель в расчетно-логической экспертной системе

C-PRIZ в обобщенном виде может быть представлена [3–6]:

$$Z_{\xi, k}^*(t) = P_{\xi, k}(\tilde{Z}_{\xi}(t), R_k, Q_k, S_k, T_k), \quad (2)$$

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, характеризуемых  $k$ -м сочетанием в обобщенной семантической сети,  $k = \overline{1, K}$ ;  $Q_k$  – оператор преобразования вектора входных воздействий в вектор выходных параметров, рассчитываемых по вычислительной модели;  $S_k$  – уравнения связи для построения компонентной модели (определение связующих переменных отдельных компонентов);  $T_k$  – длительность функционирования.

На рис. 1 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 (БД) дефектов подразумевается, что пользователь предварительно «настроил» сформированную им из отдельных понятий (компонентов) в концептуальной БЗ математическую модель на средний по парку или индивидуальный ГТД. В процессе 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 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 БД дефектов.

Реализация FDI-метода в среде экспертной системы C-PRIZ (рис. 1) предполагает решение «обратной задачи»: по вектору отклонений, на конкретном режиме работы ГТД, осуществляет-

ся 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 отклонений, 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.

В рамках FDI-метода, согласно рис. 1 и 2, настроенная на средний по парку авиационный ГТД компонентная математическая модель была адаптирована в БЗ экспертной системы С-PRIZ.

Далее на этой модели были получены: вектор эталонного состояния ГТД и векторы, характеризующие дефектное состояние двигателя. В процессе сравнительного анализа эталонного и дефектных векторов были получены векторы отклонений (невязок), образующих базу данных дефектов (статистика по различным дефектам), на основе которой была разработана экспертная база знаний, реализующая алгоритмы принятия решения, приведенный выше.

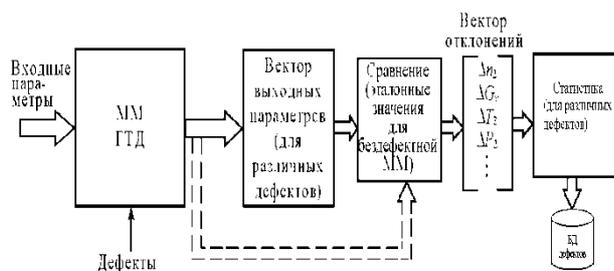


Рис. 1. Процесс формирования базы данных дефектов

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.

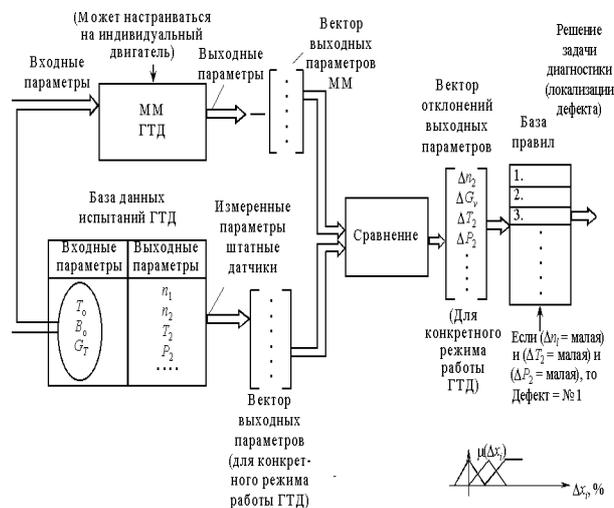


Рис. 2. Реализация FDI-метода в среде экспертной системы С-PRIZ с принятием решения на основе нечеткой логики

В данной работе элементы нечеткой логики предлагается применять совместно с такими классическими методами, как [7–9]:

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

Приведенные ниже примеры иллюстрируют особенности применения предложенного автором подхода, учитывая качественные изменения, происходящие в ГТД, например, деградацию его характеристик.

Задачи семантической визуализации [10], а также реконфигурации математической модели (обратное доказательство теорем, автоматический синтез программ) в среде С-PRIZ решаются на основе математической модели двухвального двухконтурного ГТД.

Математическая модель диагностируемого авиационного двигателя настроена на индивидуальный ГТД с учетом рассеивания параметров компрессорных характеристик. Решение данной задачи осуществлялось в два этапа:

- прямая задача, для решения которой была использована статистика характерных дефектов, проявившихся в процессе эксплуатации данного ГТД, а также подобная статистика, по-

лученная на адекватной математической модели (рис. 1);

- обратная задача, решение которой позволяет по результирующему вектору отклонений (покомпонентное сравнение параметров математической модели и измеренных данных со штатных датчиков) принять решение о фактическом техническом состоянии ГТД (рис. 2).

Для решения задачи локализации неисправных модулей проточной части ГТД используется метод диагностических матриц [1], устанавливающий связи между отклонениями измеряемых термогазодинамических параметров рабочего процесса и отклонениями расчетных конструктивных параметров состояния узлов двигателя.

Такие модели могут быть заданы в векторной форме в виде:

$$\vec{\delta x} = A^{-1} \cdot B \cdot \vec{\delta y}, \quad (3)$$

где  $\vec{\delta x}$  – вектор параметров состояния двигателя;  $\vec{\delta y}$  – вектор диагностических признаков, отнесенных 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  $\delta x_{ij}$ .

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 ма-

тематической модели ГТД позволили построить диагностическую матрицу в виде:

$$DEF\gamma_i = \vec{M}_p, \quad (4)$$

где  $\gamma_i$  – первый столбец матрицы, содержащий имитируемые дефекты;  $i = 1, \dots, N$  – количество дефектов;  $\vec{M}_p$  – 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, содержащая нулевые элементы. Все последующие строки – отклонения от эталонного состояния вследствие проявления дефекта. Всего было рассмотрено 15 различных дефектов на максимальном режиме работы авиационного двигателя. Имитация каждого дефекта на математической модели была обусловлена изменением внутреннего параметра ГТД в диапазоне 1 ... 5 %.

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

$$\vec{M}_p = DEF\gamma_i. \quad (5)$$

Фрагмент данной матрицы приведен в табл. 1. Здесь  $D_{-} y_i$  – значения параметров ГТД, соответствующие отклонениям от их эталонных данных; REZULT – столбец данных, описывающих определенную ситуацию. Например, запись PIK\_ND 3 % означает уменьшение степени повышения давления в компрессоре низкого давления на 3 % от эталонного значения. Адаптация диагностической матрицы в экспертную базу знаний осуществляется в виде продукций, 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.

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).

Таблица 1

## Диагностическая матрица двухконтурного ГТД

D_N <sub>2</sub>	D_G <sub>V</sub>	D_T <sub>2</sub>	D_P <sub>2</sub>	D_T <sub>3</sub>	D_T <sub>4</sub>	D_P <sub>4</sub>	D_P <sub>6</sub>	D_F <sub>C</sub>	D_G <sub>t</sub>	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
-0,19	0,11	0,17	0,13	0,00	-0,09	-0,32	-0,32	0,39	-0,04	-0,07	PiKND1%
-0,48	0,33	0,52	0,39	0,00	-0,27	-0,93	-0,93	1,11	-0,11	-0,18	PiKND3%
-0,68	0,55	0,87	0,65	0,00	-0,46	-1,57	-1,57	1,87	-0,19	-0,31	PiKND5%
0,19	0,07	-0,30	0,06	0,00	0,16	0,82	0,82	-0,66	0,33	0,49	KPDKND1%
0,78	0,24	-0,93	0,18	0,00	0,49	2,53	2,53	-2,08	1,03	1,54	KPDKND3%
1,16	0,39	-1,61	0,27	0,00	0,85	4,27	4,28	-3,60	1,76	2,62	KPDKND5%
-0,10	0,84	0,13	0,85	0,00	-0,07	0,53	0,53	0,28	0,72	1,02	GVND1%
-0,29	2,46	0,36	2,49	0,00	-0,19	1,60	1,60	0,79	2,16	3,01	GVND3%
-4,28	6,80	2,16	5,10	0,00	-1,16	-0,11	-0,14	4,55	3,21	5,14	GVND5%
-0,78	-0,06	0,05	-0,06	0,00	-0,03	-0,18	-0,18	0,11	-0,10	-0,15	PiKVD1%
-2,33	-0,21	0,15	-0,18	0,00	-0,08	-0,53	-0,53	0,30	-0,34	-0,47	PiKVD3%
-4,07	-0,37	0,25	-0,32	0,00	-0,13	-0,96	-1,00	0,55	-0,59	-0,84	PiKVD5%
0,68	0,21	-0,12	0,25	0,00	0,06	0,53	0,53	-0,28	0,31	0,46	KPDKVD1%
2,04	1,20	-0,41	0,58	0,00	0,21	1,64	1,64	-0,92	0,95	1,38	KPDKVD3%
3,39	1,46	-0,70	0,97	0,00	0,37	2,70	2,71	-1,55	1,60	2,32	KPDKVD5%
-0,19	0,00	0,00	-1,96	0,00	0,00	-1,96	-1,96	0,00	-1,97	-1,97	GVVD1%
0,00	0,46	0,22	0,00	0,00	0,20	0,00	0,00	0,11	0,00	0,00	GVVD3%
0,00	0,00	0,52	1,27	0,00	0,61	0,89	0,89	0,21	0,80	-1,97	GVVD5%
-0,58	-0,11	-0,17	-2,47	-1,00	-1,18	-3,42	-3,42	0,73	-4,06	-3,28	Fkr_c1%
-1,94	-0,37	-0,58	-3,66	-3,00	-3,51	-6,30	-6,31	2,07	-8,22	-5,88	Fkr_c3%
-3,20	-0,59	-0,96	-4,78	-5,00	-5,85	-9,15	-9,16	3,34	-12,39	-8,39	Fkr_c5%
0,68	0,21	0,15	-1,73	0,00	0,06	-1,42	-1,43	-0,28	-1,88	-1,50	KPDMVD1%
1,94	0,59	0,40	-1,34	0,00	0,22	-0,36	-0,36	-0,88	-1,72	-0,60	KPDMVD3%
3,39	0,99	0,66	-0,88	0,00	0,37	0,78	0,78	-1,55	-1,52	0,37	KPDMVD5%
0,00	0,00	0,00	-1,96	0,00	0,14	-1,32	-1,32	-0,57	-1,97	-1,63	KPDMND1%
0,00	0,00	0,00	-1,96	0,00	0,42	0,00	0,00	-1,75	-1,97	-0,93	KPDMND3%
0,00	0,00	0,00	-1,96	0,00	0,72	1,39	1,35	-3,00	-1,97	-0,19	KPDMND5%
0,68	0,22	0,16	-1,71	0,00	-0,09	-1,53	-1,53	-0,25	-1,88	-1,61	KPDTVD1%
2,23	0,65	0,44	-1,26	0,00	-0,24	-0,68	-0,68	-0,74	-1,68	-0,89	KPDTVD3%
3,69	1,08	0,71	-0,80	0,00	-0,38	0,25	0,25	-1,31	-1,47	-0,13	KPDTVD5%
0,00	0,00	0,00	-1,96	0,00	0,00	-1,32	-1,32	-0,63	-1,97	-1,71	KPDTND1%
0,00	0,00	0,00	-1,96	0,00	0,00	0,00	-0,04	-1,94	-1,97	-1,15	KPDTND3%

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. 3–6 (функции принадлежности для других лингвистических переменных приведены в приложении). 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 % изменению параметров его узлов.

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).

Таблица 2

## Формирование базы нечетких правил на основе диагностической матрицы

D_N <sub>2</sub>	D_G <sub>v</sub>	D_T <sub>2</sub>	D_P <sub>2</sub>	D_T <sub>3</sub>	D_T <sub>4</sub>	D_P <sub>4</sub>	D_P <sub>6</sub>	D_F <sub>c</sub>	D_G <sub>t</sub>	D_R	REZULT
0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	ETALON
-	+	+	+	-	-	-	-	+	-	-	PiKND1%
-	+	+	+	-	-	-	-	+	-	-	PiKND3%
-	+	+⊗	+	-	-	-⊗	-⊗	+⊗	-	-	PiKND5%
+	+	-	+	-	+	+	+	+	+	+	KPDKND1%
+	+	-	+	-	+	+	+	+	+	+	KPDKND1%
+	+	-	+	-	+	+	+	+	+	+	KPDKND3%
+⊗	+	-⊗	+	-	+	+	+	+⊗	+⊗	+	KPDKND5%
-	+	+	+	-	-	-	-	+	+	+	GVND1%
-	+	+	+	-	-	-	-	+	+	+	GVND3%
-⊗	+	+⊗	+⊗	-	-	-	-	+	+	+⊗	GVND5%
-	-	+	-	-	-	-	-	+	-	-	PiKVD1%
-	-	+	-	-	-	-	-	+	-	-	PiKVD3%
-⊗	-⊗	+	-⊗	-	-	-	-	+	-	-⊗	PiKVD5%
+	+	-	+	-	+	+	+	-	+	+	KPDKVD1%
+	+	-	+	-	+	+	+	-	+	+	KPDKVD3%
+⊗	+⊗	-⊗	+	-	+	+	+	-	+	+⊗	KPDKVD5%
+	+	+	+	-	+	+	+	+	+	-	GVVD1%
+	+	+	+	-	+	+	+	+	+	-	GVVD3%
+	+	+⊗	+⊗	-	+⊗	+	+	+	+⊗	-	GVVD5%
-	-	-	-	-	-	-	-	+	-	-	Fkr_c1%
-	-	-	-	-	-	-	-	+	-	-	Fkr_c3%
-⊗	-	-	-	-	-⊗	-	-	+	-⊗	-⊗	Fkr_c5%
+	+	+	+	-	+	+	+	-	+	+	KPDMVD1%
+	+	+	+	-	+	+	+	-	+	+	KPDMVD3%
+	+	+	+⊗	-	+	+⊗	+⊗	-	+⊗	+	KPDMVD5%
-	-	-	-	-	+	+	+	-	-	+	KPDMND1%
-	-	-	-	-	+	+	+	-	-	+	KPDMND3%
-	-	-	-	-	+⊗	+⊗	+⊗	-	-	+⊗	KPDMND5%
+	+	+	+	-	-	+	+	-	+	+	KPDTVD1%
+	+	+	+	-	-	+	+	-	+	+	KPDTVD3%
+⊗	+⊗	+	+	-	-	+	+	-	+⊗	+⊗	KPDTVD5%
-	-	-	-	-	-	+	+	-	-	+	KPDTND1%
-	-	-	-	-	-	+	+	-	-	+	KPDTND3%
-	-	-	-⊗	-	-	+⊗	+⊗	-	-	+⊗	KPDTND5%
-	-	+	+	-	-	-	-	+	-	-	SIGKC1%
-	-	+	+	-	-	-	-	+	-	-	SIGKC3%
-	-	+	+⊗	-	-	-⊗	-	+	-⊗	-⊗	SIGKC5%
-	-	-	-	-	-	-	-	+	-	+	SIGSOP1%
-	-	-	-	-	-	-	-	+	-	+	SIGSOP3%
-	-	-	-⊗	-	-	-⊗	-	+⊗	-⊗	+	SIGSOP5%

Таблица 3

## База нечетких экспертных правил

Атрибуты и их значения	Результат
Если $(\Delta T_2 = Z) \wedge (\Delta P_4 = Z) \wedge (\Delta P_6 = Z) \wedge (\Delta F_c = MP)$	то $Y_1 = \text{PIKND}$
Если $(\Delta N_2 = Z) \wedge (\Delta T_2 = Z) \wedge (\Delta F_c = MN) \wedge (\Delta G_t = MP)$	то $Y_2 = \text{KPDKND}$
Если $(\Delta N_2 = LN) \wedge (\Delta T_2 = Z) \wedge (\Delta P_2 = LP) \wedge (\Delta R = LP)$	то $Y_3 = \text{GVND}$
Если $(\Delta N_2 = LN) \wedge (\Delta G_v = Z) \wedge (\Delta P_2 = Z) \wedge (\Delta R = Z)$	то $Y_4 = \text{PIKVD}$
Если $(\Delta N_2 = MP) \wedge (\Delta G_v = Z) \wedge (\Delta T_2 = Z) \wedge (\Delta R = MP)$	то $Y_5 = \text{KPDKVD}$
Если $(\Delta T_2 = Z) \wedge (\Delta P_2 = Z) \wedge (\Delta T_4 = Z) \wedge (\Delta G_t = Z)$	то $Y_6 = \text{GVVD}$
Если $(\Delta N_2 = MN) \wedge (\Delta T_4 = LN) \wedge (\Delta G_t = LN) \wedge (\Delta R = LN)$	то $Y_7 = \text{FKR}$
Если $(\Delta P_4 = Z) \wedge (\Delta P_6 = Z) \wedge (\Delta P_2 = Z) \wedge (\Delta G_t = MN)$	то $Y_8 = \text{KPDMVD}$
Если $(\Delta T_4 = Z) \wedge (\Delta P_4 = Z) \wedge (\Delta P_6 = Z) \wedge (\Delta R = Z)$	то $Y_9 = \text{KPDMND}$
Если $(\Delta N_2 = MP) \wedge (\Delta G_v = Z) \wedge (\Delta G_t = Z) \wedge (\Delta R = Z)$	то $Y_{10} = \text{KPDTVD}$
Если $(\Delta P_2 = MN) \wedge (\Delta P_4 = Z) \wedge (\Delta G_t = MP) \wedge (\Delta F_c = MN)$	то $Y_{11} = \text{SIGKC}$
Если $(\Delta P_2 = MN) \wedge (\Delta P_4 = MN) \wedge (\Delta F_c = LN) \wedge (\Delta G_t = MN)$	то $Y_{12} = \text{SIGSOP}$

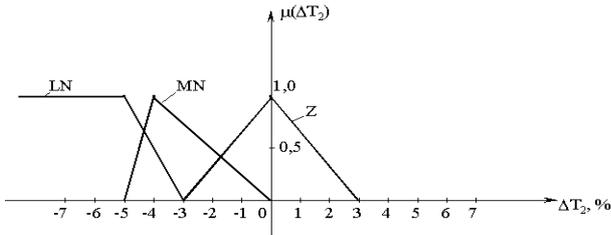


Рис. 3. Функции принадлежности лингвистической переменной  $\Delta T_2$

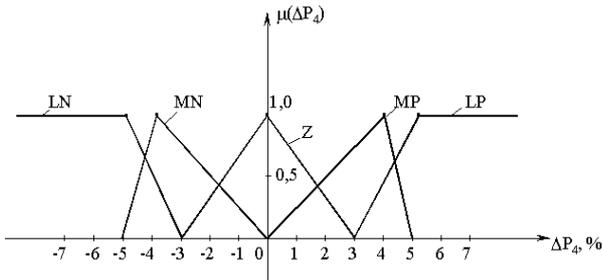


Рис. 4. Функции принадлежности лингвистической переменной  $\Delta P_4$

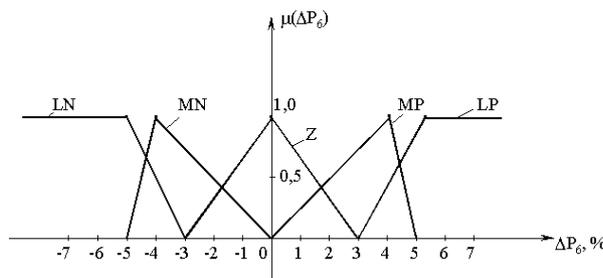


Рис. 5. Функции принадлежности лингвистической переменной  $\Delta P_6$

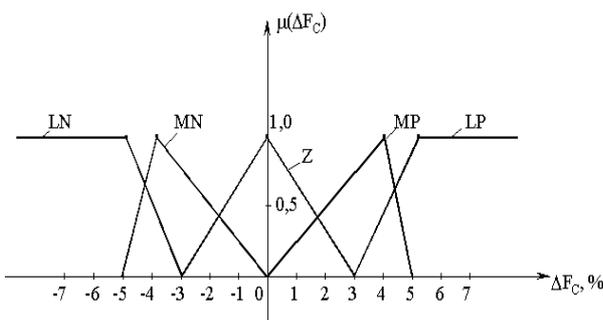


Рис. 6. Функции принадлежности лингвистической переменной  $\Delta F_C$

Пусть в процессе сравнительного анализа измеренных с ГТД и вычисленных по адекватной ему математической модели параметров получен вектор невязок – восьмая и девятая строки сверху табл. 3, тогда анализ функций принадлежности лингвистических переменных,

входящих в данную строку (рис. 3–6), позволяет экспертной системе вычислить следующие значения функций принадлежности:

а) Для второй строки (1%-отклонение степени повышения давления в компрессоре низкого давления) можно найти:

$$\begin{aligned} \mu_Z(\Delta T_2^{(k)}) &= 0,95; & \mu_Z(\Delta P_6^{(k)}) &= 0,925; \\ \mu_{MN}(\Delta T_2^{(k)}) &= 0,05; & \mu_{MN}(\Delta P_6^{(k)}) &= 0,075; \\ \mu_Z(\Delta P_4^{(k)}) &= 0,875; & \mu_Z(\Delta F_C^{(k)}) &= 0,84; \\ \mu_{MN}(\Delta P_4^{(k)}) &= 0,0875; & \mu_{MN}(\Delta F_C^{(k)}) &= 0,1 \end{aligned} \quad (6)$$

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

$$\min\left(\mu_Z(\Delta T_2^{(k)}) \& \mu_Z(\Delta P_4^{(k)}) \& \mu_Z(\Delta P_6^{(k)}) \& \mu_Z(\Delta F_C^{(k)})\right) \rightarrow 0,84; \quad (7)$$

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

$$\min\left(\mu_{MN}(\Delta T_2^{(k)}) \& \mu_{MN}(\Delta P_4^{(k)}) \& \mu_{MN}(\Delta P_6^{(k)}) \& \mu_{MN}(\Delta F_C^{(k)})\right) \rightarrow 0,05 \quad (8)$$

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

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

$$\begin{aligned} \mu_Z(\Delta T_2^{(k)}) &= 0,86; & \mu_Z(\Delta P_6^{(k)}) &= 0,7; \\ \mu_Z(\Delta P_4^{(k)}) &= 0,7; & \mu_{MN}(\Delta P_6^{(k)}) &= 0,24; \\ \mu_{MN}(\Delta P_4^{(k)}) &= 0,24; & \mu_Z(\Delta F_C^{(k)}) &= 0,59; \\ \mu_{MP}(\Delta F_C^{(k)}) &= 0,29. \end{aligned} \quad (9)$$

Рассуждая по аналогии, приведенной выше, имеем:

$$\min(\mu_{Z_{\Sigma_i}}) \rightarrow 0,59. \quad (10)$$

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 по ТУ, что, в свою очередь, снизило степень повышения давления в КНД на 3 %. Ре-

зультаты анализа экспертной системы совпадают с результатами исследований, проведенных в ходе стендовых испытаний снятого с эксплуатации ГТД.

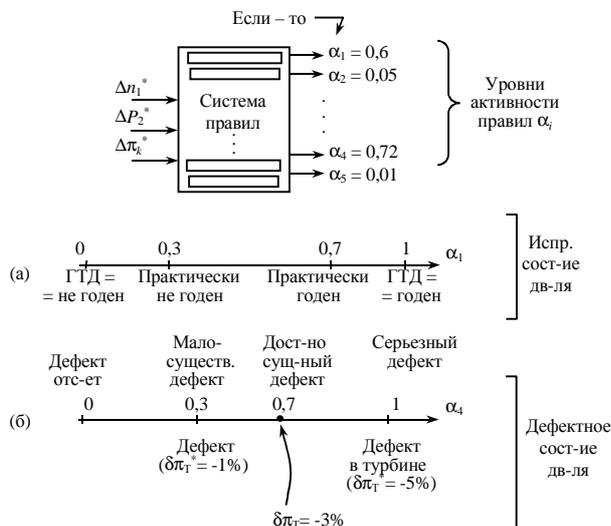


Рис. 7. Принятие решений диагностической ЭС C-PRIZ

Логика процесса принятия решений 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 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) соответствует уровню активности правила  $\alpha_4$  и диагнозу «дефект в узле турбины». Максимальное значение  $\alpha_4 = 1$  и в данном случае характеризует «существенный дефект», соответствующий уменьшению на 5 % степени понижения давления на турбине  $\delta P_t^* = -5\%$ , а минимальное значение  $\alpha_4 = 0$  означает, что данный дефект отсутствует. Промежуточные значения  $\alpha_4$  могут означать, например, что дефект в турбине низкого

давления соответствует уменьшению степени понижения давления на турбине на 1 % ( $\alpha_4 = 0,3$ ) или на 3 % ( $\alpha_4 = 0,7$ ).

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

## ВЫВОДЫ

1. 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.

2. 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.

3. 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.

4. Разработана инженерная методика реализации рассмотренных методов и алгоритмов для создания гибридной базы знаний, разработанного исследовательского прототипа экспертной системы мониторинга.

5. Показано, что применение разработанной автором 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 и диагностики в 2–3 раза за счет использования индивидуальной настраиваемой модели авиационного двигателя и расширенной экспертной базы знаний о характеристиках ГТД.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ахмедзянов А. М., Дубравский Н. Г., Тунаков А. П. Диагностика состояния ВРД по термодинамическим параметрам. М.: Машиностроение, 1983. 206 с.
2. Ладыгин С. Ф. Эффективность методов уравнивания в задачах идентификации параметров математических моделей ГТД // Испытания авиационных двигателей. 1985. № 13. С. 31–41.
3. Таран Е. М. Универсальный метод согласования математической модели ГТД с результатами испытаний // Испытания авиационных двигателей. 1986. № 14. С. 63–70.
4. Чуян Р. К. Методы математического моделирования двигателей летательных аппаратов. М.: Машиностроение, 1988. 288 с.
5. Лозицкий Л. П., Степаненко В. П., Студеникин В. А. Практическая диагностика авиационных газотурбинных двигателей. М.: Транспорт, 1985. 102 с.
6. Жернаков С. В. Комплексное моделирование авиационного двигателя в среде гибридных экспертных систем // Автоматизация и современные технологии. 2001. № 5. С. 22–26.

7. Тэрано Т., Асаи К., Сугэно М. Прикладные нечеткие системы. М.: Мир, 1993. 368 с.

8. Жернаков С. В. Нейросетевая экспертная система комплексного мониторинга и управления эксплуатацией авиационных двигателей // Нейрокомпьютеры: разработка и применение. М.: Радиотехника. 2001. № 6. С. 33–40.

9. Жернаков С. В. Интеллектуальный мониторинг и диагностика параметров газотурбинного двигателя гибридными экспертными системами // Автоматизация и современные технологии. М.: Машиностроение, 2001. № 12. С. 16–22.

10. Соломатин Н. Н. Информационные семантические системы. М.: Высшая школа, 1989. 127 с.

#### ОБ АВТОРАХ

**Жернаков Сергей Владимирович**, зав. каф. электроники и биомедицинских технологий. Дипл. инженер по промышл. электронике (УГАТУ, 1984). Д-р техн. наук по системн. анализу, управлению и обработке информации (УГАТУ, 2005). Иссл. в обл. интеллектуальных систем.

**Равилов Рустэм Фанильевич**, асп. каф. вычислительн. техники и защиты информации. Дипл. инженер по энергетическим установкам и системам (ЮУГТУ, 2000). Готовит диссертацию в области контроля и диагностики масляной системы авиац. двигателей.