

АВИАЦИОННАЯ И РАКЕТНО-КОСМИЧЕСКАЯ ТЕХНИКА

УДК 621.735:681.5

С. В. ЖЕРНАКОВ

**МЕТОДОЛОГИЯ СИСТЕМНОГО АНАЛИЗА
ДЛЯ РЕШЕНИЯ ПРОБЛЕМЫ
ИНФОРМАЦИОННОГО МОНИТОРИНГА
СОСТОЯНИЯ АВИАЦИОННОГО ДВИГАТЕЛЯ**

В статье применяется методология системного анализа к разработке перспективных систем информационного мониторинга состояния авиационного двигателя. Предложен комплекс функциональных моделей процесса мониторинга авиационных двигателей. Разработана обобщенная функциональная модель процесса мониторинга состояния авиационного двигателя. *Функциональная модель; мониторинг; экспертная система; методология системного моделирования*

Проблема информационного мониторинга состояния авиационного газотурбинного двигателя (ГТД) не является тривиальной. Среди основных вопросов, требующих своего решения в рамках этой проблемы, можно отметить следующие:

- решение задач мониторинга авиационного двигателя в распределенной системе автоматизированных рабочих мест (АРМов);
- разработка экспертных систем в условиях распределенных баз данных и знаний;
- взаимодействие баз данных и знаний на локальном и глобальном уровнях;
- необходимые ресурсы для реализации мониторинга ГТД;
- роль системного моделирования для решения данной проблемы и т. д.

Ответ на эти и другие вопросы позволит обоснованно и эффективно решить проблему мониторинга состояния авиационного ГТД.

В последнее время при создании сложных информационных систем роль системного моделирования существенно возросла. Подтверждение тому – наличие встроенных CASE-средств в современных базах данных (Oracle, Informix, R-Base и др.), а также в большинстве экспертных систем. Однако присутствие этих средств в качестве базовых компонент системного моделирования, на основе которых в конечном итоге строится то или иное приложение, еще не означает, что они будут правильно

использоваться при решении прикладных задач в той или иной области применения. Это объясняется тем, что кроме общей автоматизации создания приложения CASE-средствами, до сих пор отсутствует соответствующая методическая и методологическая поддержка данного процесса. Поэтому, несмотря на кажущуюся внешнюю простоту, общий успех системного моделирования определяется опытом, знаниями и интуицией пользователя.

Другим аспектом этого процесса является объект исследования, сложность которого в конечном итоге определяет нетривиальность его представления (формализации) в рамках SADT-методологии.

Исходя из сказанного выше, применение методологии системного моделирования на этапе проектирования интеллектуальной системы мониторинга позволяет грамотно обосновать и сформулировать требования к будущей интеллектуальной системе, а также разработать системный проект, выделить полное множество функций и определить взаимосвязь ее отдельных компонент для дальнейшей реализации в виде исследовательского прототипа экспертной системы мониторинга параметров авиационного двигателя.

Формализация информационного портрета ГТД в рамках SADT-методологии и IDEF-технологии является отдельной проблемой, так как системная модель в конечном счете собирает всю информацию о процессе мониторинга авиационного двигателя в информационную «кучу». Поэтому основной задачей, решаемой на данном этапе, является «прозрачность» представления ГТД и его подсистем в процессе

Контактная информация: (347) 273-77-89

Результаты научных исследований поддержаны грантом РФФИ: 08-08-00774-а

мониторинга (выделение основных функций и решаемых задач), связь информационных потоков с определенными ранее структурами баз данных и знаний, а также его взаимосвязь в рамках сценариев работы с экспертной системой и внешних интерфейсов со SCADA-системами, PDM- и STEP-стандартами, CALS-технологией, другими CASE-средствами.

Таким образом, на основе системной модели, на этапе проектирования интеллектуальной системы мониторинга параметров авиационного ГТД, с использованием SADT-методологии и IDEF-технологии необходимо выполнить следующую последовательность шагов:

- разработать множество функциональных моделей с целью выделения полного множества функций и задач, решаемых экспертной системой;

- разработать множество информационных моделей, определяющих логическую структуру баз данных и знаний, а также способы и механизмы управления ими и взаимодействия (обоснование содержания, наполнения, управления информационными потоками);

- разработать динамическую модель, определяющую правила работы с экспертной системой, которые являются основой для создания интерфейса (сценариев) с пользователем и определяют динамику взаимодействия экспертной системы с базами данных и знаний.

Завершающим этапом системного моделирования является системный проект, формирующий контуры исследовательского прототипа экспертной системы и перечень требований, реализуемых ею.

Реализацию последовательности перечисленных выше шагов для решения проблемы информационного мониторинга состояния авиационного ГТД подробно рассмотрим ниже.

РАЗРАБОТКА КОМПЛЕКСА ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ МОДЕЛЕЙ ПРОЦЕССА МОНИТОРИНГА ПАРАМЕТРОВ АВИАЦИОННОГО ГТД

Функциональная модель (рис. 1) является основой содержательного представления системного моделирования процесса мониторинга параметров авиационного двигателя.

Она может детализироваться с учетом тех задач, которые будут решаться в процессе мониторинга ГТД. Процесс мониторинга параметров авиационного ГТД J в общем случае характеризуется совокупностью решаемых задач J_i и их конечными результатами:

$$J = \{J_i\}, \text{ где } i \in [1, I].$$

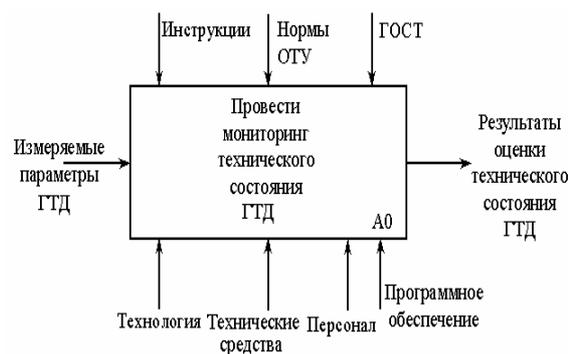


Рис.1. Функциональная модель процесса мониторинга технического состояния ГТД

Каждая из задач на локальном уровне может быть описана в виде:

$$J_i = \{LJ_{ij}\}, \text{ где } i \in [1, I], j \in [1, m].$$

При этом задачи на локальном уровне $\{LJ_{ij}\}$ могут быть также конкретизированы:

$$LJ_{ij} = \{kJ_{js}\}, \text{ где } j \in [1, m], s \in [1, k],$$

как $\{kJ_{js}\}$ подзадачи, решаемые на локальном уровне.

Решение перечисленных выше задач позволяет определить фактическое техническое состояние ГТД, т. е. осуществить мониторинг его технического состояния и управление эксплуатацией:

$$J_i = \bigcup_{s=1}^k kJ_{js}, \text{ где } i \in [1, I], j \in [1, m], s \in [1, k]. \quad (1)$$

Функциональная модель J на теоретико-множественном уровне может быть представлена как:

$$J = \langle V, W, L, Q, T \rangle, \quad (2)$$

где V – множество измеряемых параметров ГТД; W – множество нормативно-директивных документов, необходимых для качественного и эффективного процесса мониторинга; L – множество программно-аппаратных и людских ресурсов для процесса мониторинга состояния авиационного ГТД; Q – множество результатов оценки технического состояния ГТД; T – текущее время мониторинга.

На рис. 1 приведена функциональная модель процесса мониторинга технического состояния ГТД. Анализ современного состояния процесса мониторинга технического состояния ГТД [1–3] показывает, что существующие нормативные документы ГОСТы, ОСТы, ОТУ [4–13] устарели и требуют существенных изменений и доработок. Это связано с новыми международными стандартами ISO 9000, а также с требованиями создания авиационного ГТД

в едином информационном пространстве на всех этапах жизненного цикла: создание цифрового портрета авиационного двигателя.

Разработка интегрированной распределенной интеллектуальной системы, основной функцией которой является объединение систем поддержки принятия решений в рамках отрасли, при выполнении широкого спектра задач: испытаний, доводки, ремонта, эксплуатации и т. д. подразумевает использование CALS-технологии, SCADA-систем, PDM-систем, STEP-стандартов, CASE-средств [1, 14–19].

Их комплексное применение на основе клиент / серверных технологий позволит эффективно и качественно проводить процесс мониторинга технического состояния ГТД.

Технические средства, применяемые в процессе решения задач мониторинга технического состояния авиационного ГТД, представляют собой: сетевое обеспечение (Internet, Intranet); вычислительную технику, имеющую различную конфигурацию, и вычислительную платформу (от IBM PC до спаркстанций), программное обеспечение (пустые и специализированные экспертные оболочки) среды моделирования Matcad, Matlab, Maple, Mathematica и т. д.; объектно-ориентированные языки программирования Java, C++; операционные системы – Windows, UNIX, NetWare, OS/2 и др.; базы данных испытаний, хранящие измеренную на ГТД информацию – Oracle, Informix, R-Base, Access, FoxPro и др.; специализированные пакеты прикладных программ, разработанные для процесса моделирования и т. д.

Персонал, рассмотренный выше на (рис. 1), представляет собой различные подразделения, участвующие в процессе информационного мониторинга технического состояния ГТД: операторы, администраторы баз данных, инженеры-расчетчики; инженеры-программисты, инженеры испытательного стенда; диагносты; инженеры ОТК; специалисты по ремонту авиационных ГТД; специалисты по надежности и т. д. Функциональная модель IDEF0 (рис. 1) декомпозируется на иерархию диаграмм (рис. 2), образующих следующие функциональные блоки:

1 – запись данных измерений ГТД (измеренные в процессе испытаний параметры авиационного двигателя – нормируются, калибруются, масштабируются и записываются в базу данных испытаний в темпе реального времени);

2 – статистическая обработка данных ГТД (корреляционный, факторный, регрессионный анализ и т. д.), результатом которой является

отсеивание ошибок измерений (аномальных значений);

3 – контроль параметров авиационного двигателя, в процессе которого дается оценка фактического состояния ГТД (двигатель исправен или неисправен);

4 – диагностика состояния ГТД, на основании которой устанавливается наличие неисправности и локализуется место ее проявления;

5 – анализ тренда параметров и прогноз технического состояния ГТД, на основании которых выявляются тенденции изменения параметров авиационного двигателя, а также осуществляется краткосрочный, среднесрочный и долгосрочный прогноз их поведения;

6 – принятие решения о техническом состоянии ГТД, на основании которого осуществляется дальнейшая эксплуатация авиационного двигателя или его снятие.

Детализация функционального блока 1 на рис. 2 дает иерархию диаграмм (рис. 3), где в качестве выполняемых функций отмечены:

11 – фильтрация данных;

12 – нормировка (масштабирование) измеренных параметров ГТД;

13 – визуализация измеренных параметров ГТД (графическая или табличная интерпретация результатов измерений).

По аналогии функциональная декомпозиция блока 2 на рис. 2 представлена на рис. 4 в виде иерархии диаграмм, где блок 21 представляет собой подсистему анализа статистических характеристик выборки, на вход которого поступают данные после предобработки, а на его выходе – результаты статистического анализа. Они являются исходным материалом для блока 22, производящего корреляционный анализ выборки.

Результаты работы данного блока подаются в блок 23 – удаления аномальных значений из выборки, который «фильтрует» выборку, удаляя явные ошибки измерений. Функции и механизмы управления описаны выше.

Детализация блока 3 на рис. 2 показана на рис. 5, где процесс контроля технического состояния ГТД представлен следующими функциональными блоками: 31 – контроль технического состояния проточной части ГТД (результаты контроля термогазодинамических параметров авиационного двигателя); 32 – контроль технического состояния топливно-масляной системы ГТД (элементы, узлы, агрегаты топливно-масляной системы); 33 – контроль технического состояния гидравлической системы ГТД (элементы, узлы, агрегаты гидромеханической системы авиационного двигателя).

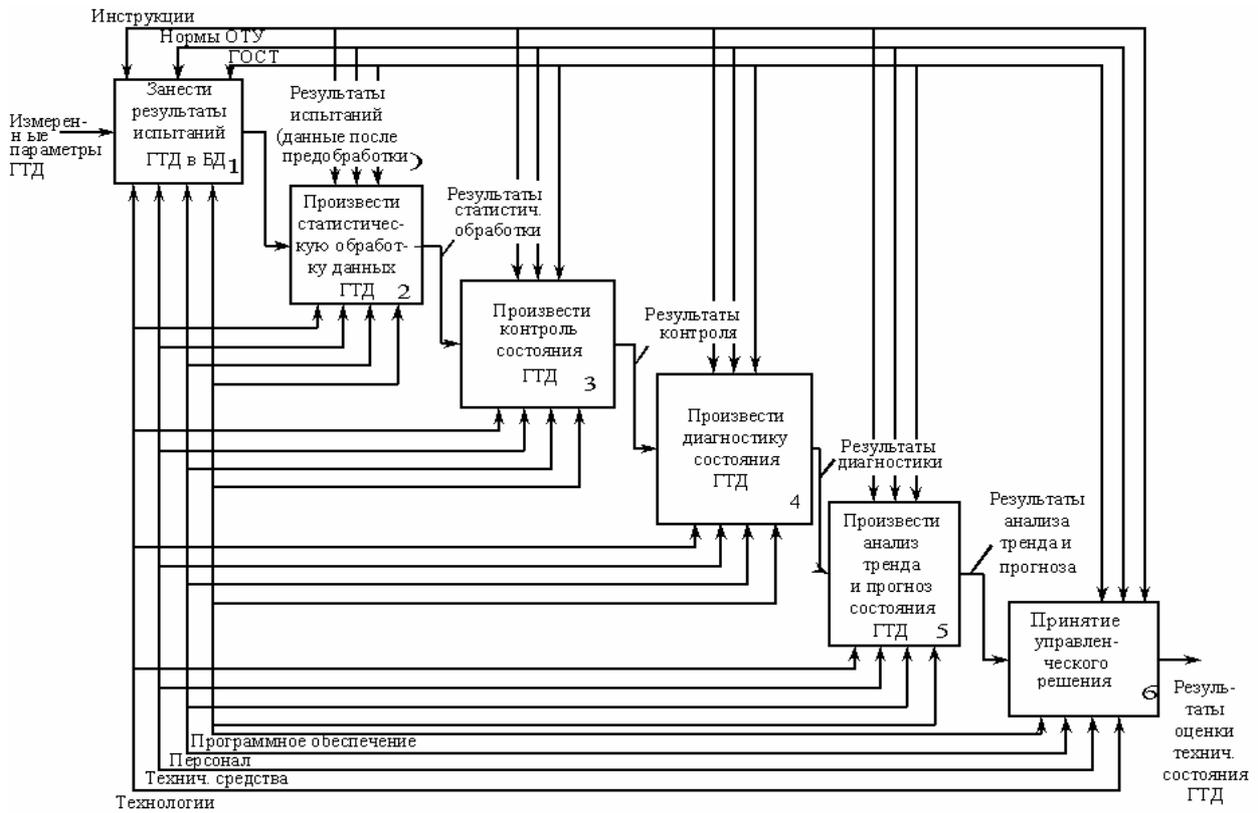


Рис. 2. Функциональная модель процесса мониторинга технического состояния GTD

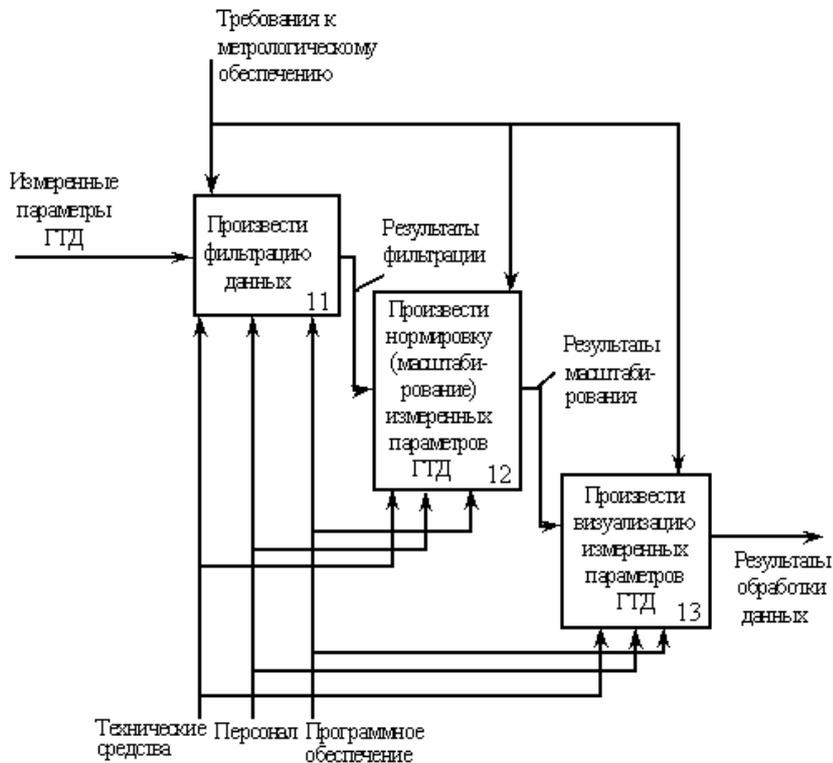


Рис. 3. Предобработка данных из БД испытаний GTD

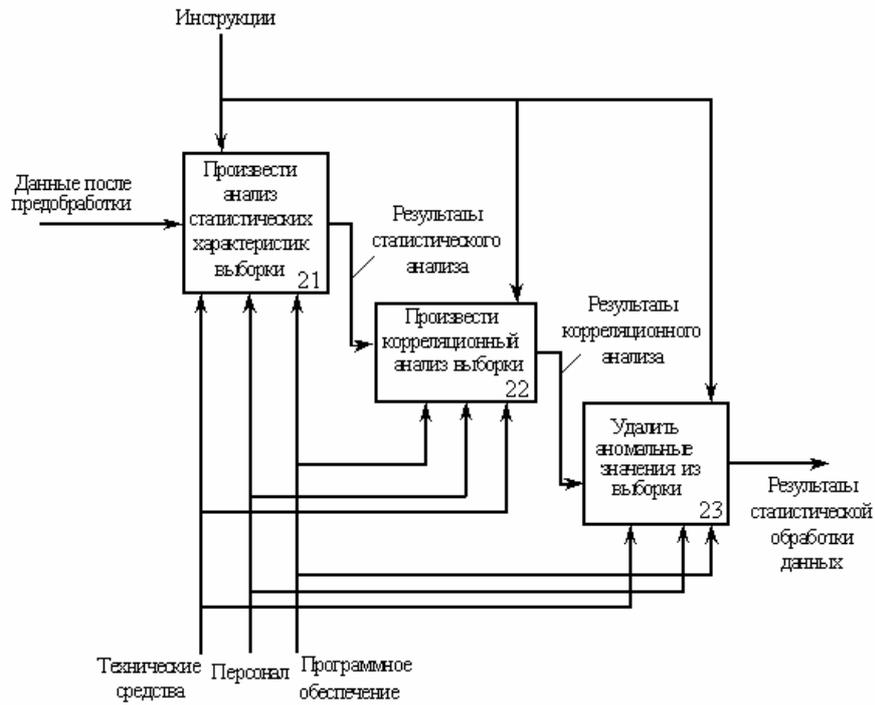


Рис. 4. Статистическая обработка данных из базы данных испытаний ГТД

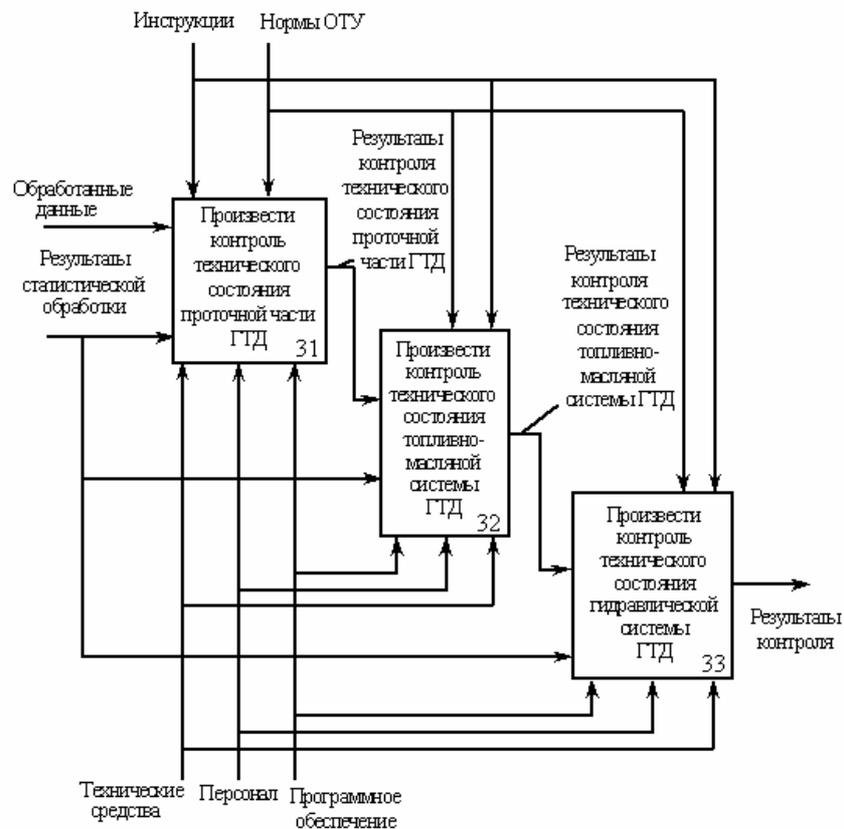


Рис. 5. Контроль технического состояния ГТД

При этом на вход блоков 31–33 поступают результаты статистической обработки, а на вход блока 31 дополнительно обработанные данные (результаты их предварительной нормировки, калибровки и масштабирования).

Декомпозиция других функциональных блоков, осуществляющих мониторинг ГТД, производится по аналогии, приведенной выше.

Обобщенная функциональная модель возможных исходов процессов мониторинга состояния ГТД показана на рис. 6. При этом перечень основных функций, выполняемых функциональной моделью, представлен ниже:

F_1 – функция хранения результатов испытаний ГТД;

F_2 – функция статистической обработки данных ГТД;

F_{2a} – функция статистической обработки результатов испытаний при корректно измеренных данных ГТД;

$F_{2б}$ – функция статистической обработки результатов испытаний при некорректно измеренных данных;

F_3 – функция контроля параметров авиационного двигателя;

F_{3a} – функция контроля технического состояния ГТД при корректно измеренных данных и при выполнении требований статистической обработки результатов испытаний;

$F_{3б}$ – функция контроля технического состояния ГТД при некорректно измеренных данных ГТД и при выполнении требований статистической обработки результатов испытаний;

$F_{3в}$ – функция контроля технического состояния ГТД при некорректно измеренных данных ГТД и при выполнении требований статистической обработки результатов испытаний;

F_4 – функция диагностики технического состояния ГТД;

F_{4a} – функция диагностики технического состояния ГТД при корректно измеренных данных, а также при выполнении требований статистической обработки результатов испытаний и контроле технического состояния авиационного двигателя;

$F_{4б}$ – функция диагностики технического состояния ГТД при некорректно измеренных данных, а также при выполнении требований статистической обработки результатов испытаний и при полном или неполном контроле технического состояния авиационного двигателя;

$F_{4в}$ – функция диагностики технического состояния ГТД при некорректно измеренных данных, а также при невыполнении требований статистической обработки результатов испыта-

ний и требований контроля технического состояния авиационного двигателя;

F_5 – функция прогноза технического состояния ГТД;

F_{5a} – функция прогноза технического состояния ГТД при корректно измеренных данных, а также при выполнении требований статистической обработки результатов испытаний, контроля и диагностики технического состояния авиационного двигателя;

$F_{5б}$ – функция прогноза технического состояния ГТД при некорректно измеренных данных, а также при выполнении требований статистической обработки результатов испытаний, контроля и диагностики технического состояния авиационного двигателя;

$F_{5в}$ – функция прогноза технического состояния ГТД при некорректно измеренных данных, а также при невыполнении требований статистической обработки результатов испытаний, контроля и диагностики технического состояния авиационного двигателя.

Процесс мониторинга технического состояния ГТД, в рамках обобщенной функциональной модели, может иметь следующие возможные исходы:

S_1 – двигатель исправен и решение «В норме»; или двигатель неисправен и решение – «Не годен»;

S_2 – двигатель исправен, но решение «Не годен» – ошибка I рода;

S_3 – двигатель неисправен, но решение «В норме» – ошибка II рода.

Ошибки принятия решения имеют различные последствия, а качество решения задач диагностирования устанавливается системой показателей в соответствии с ГОСТ [6]:

1. Вероятность ошибки диагностирования P_{ij} , $i \neq j$ – вероятность совместного наступления двух событий: объект находится в состоянии i , а считается находящимся в состоянии j .

2. Апостериорная вероятность ошибки диагностирования P_{ij}^A , $i \neq j$ – вероятность нахождения объекта в состоянии i при условии, что получен результат – объект находится в состоянии j .

3. Вероятность правильного диагностирования P_o – полная вероятность того, что по выбранному правилу принятия решения определяется то состояние, в котором действительно находится объект.

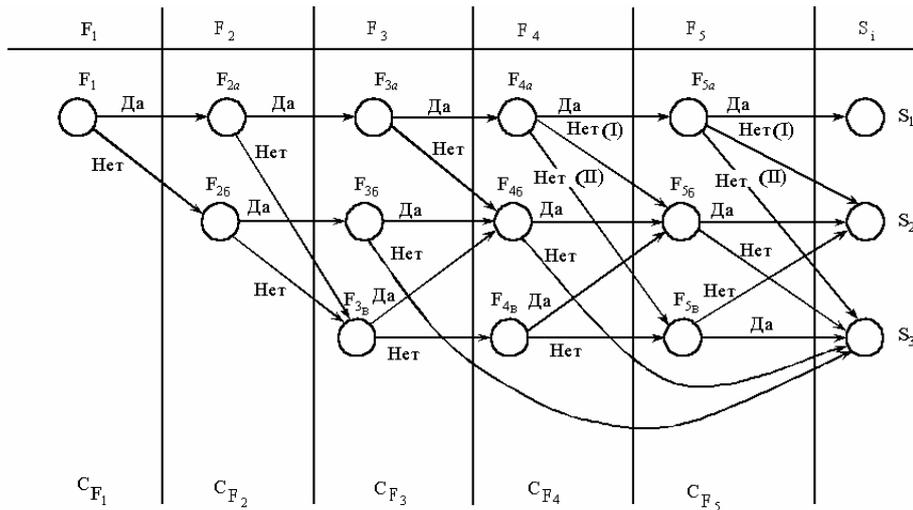


Рис. 6. Обобщенная функциональная модель возможных исходов процесса мониторинга ГТД

Ошибки II рода на этапе проектирования приводят к необходимости доработок двигателя на стадии производства и эксплуатации, вплоть до замены созданного парка двигателей. Ошибки этого рода на этапе производства сокращают ресурс работы двигателя, а на стадии эксплуатации приводят к летным происшествиям [20–22].

Они характеризуются вероятностью P_{II} события, состоящего в принятии решения о завершении очередного этапа жизненного цикла, если цель очередного этапа жизненного цикла не достигнута. Вероятность этого события определяется вероятностью одновременных событий несоответствия двигателя техническим условиям и ошибок диагностирования II рода.

Принимается, что техническое состояние двигателя является полностью контролируемым, а расчетное соотношение для определения вероятности ошибок II рода P_{II} имеет вид:

$$P_{II} = [1 - P_{дв}] [1 - P_{л}]^b, \quad (3)$$

где $P_{дв}$ – вероятность соответствия двигателя техническим условиям; b – показатель ошибок II рода.

Увеличение стоимости жизненного цикла обусловлено также ошибками контроля его технического состояния I рода, увеличивающими число доработок двигателя на этапе проектирования, количество повторных переборок двигателя при производстве и ремонте, количество досрочных съёмов двигателя с эксплуатации и приводящими к увеличению количества проводимых испытаний на всех этапах жизненного цикла.

Вероятность снятия работоспособного двигателя с эксплуатации определяется вероятностью

одновременного наступления события работоспособности ГТД и ошибок диагностирования I рода:

$$P_I = P_{дв}(1 - P_{л})^a, \quad (4)$$

где a – показатель ошибок I рода.

Таким образом, ошибки диагностирования технического состояния на различных этапах жизненного цикла ГТД приводят к повторному проведению всех видов испытаний в соответствии с их технологией и увеличению, как следствие, стоимости жизненного цикла в целом.

На основании описанных выше функций можно вычислить общую вероятность всех исходов и общие затраты на процесс мониторинга ГТД.

Так, общая вероятность всех возможных исходов процессов мониторинга ГТД может быть вычислена:

$$P(S_i) = \sum_{i,j,l,k} P_i P_j (1 - P_k) (1 - P_l), \quad (5)$$

а общие затраты на реализацию функций мониторинга:

$$C_{\Sigma} = \sum_j C_{F_j}, \quad (6)$$

где C_{F_j} – затраты на реализацию функции C_{F_j} .

Вероятность каждого отдельно взятого исхода процесса мониторинга ГТД с учетом (рис. 6) может быть вычислена следующим образом:

- для события S_1 :

$$P(S_1) = P_1 \cdot P_{2a} \cdot P_{3a} \cdot P_{4a} \cdot P_{5a}; \quad (7)$$

- для события S_2 :

$$P(S_2) = P_1 \cdot P_{3a} \cdot (1 - P_{3a}) \cdot P_{46} \cdot P_{56} + P_1 \cdot P_{2a} \times \\ \times P_{3a} \cdot (1 - P_{4a}) \cdot P_{56} + \\ + P_1 \cdot P_{2a} \cdot P_{3a} \cdot P_{4a} \cdot (1 - P_{5a}) + (1 - P_1) \cdot P_{26} \cdot P_{36} \times \\ \times P_{46} \cdot P_{56} + \\ + (1 - P_1) \cdot (1 - P_{26}) \cdot P_{36} \cdot P_{46} \cdot P_{56} + P_1 \cdot (1 - P_{2a}) \times \\ \times P_{36} \cdot P_{46} \cdot P_{56} + \\ + P_1 \cdot P_{2a} \cdot P_{3a} \cdot (1 - P_{4a}) \cdot P_{56} + (1 - P_1) \cdot (1 - P_{26}) \times \\ \times (1 - P_{36}) \cdot P_{46} \cdot P_{56} + \\ + (1 - P_1) \cdot (1 - P_{26}) \cdot (1 - P_{36}) \cdot (1 - P_{46}) \cdot (1 - P_{56});$$

• для события S_3 :

$$P(S_3) = P_1 \cdot P_{2a} \cdot P_{3a} \cdot P_{4a} \cdot (1 - P_{5a}) + P_1 \cdot P_{2a} \cdot P_{3a} \times \\ \times (1 - P_{4a}) \cdot (1 - P_{56}) + \\ + P_1 \cdot P_{2a} \cdot P_{3a} \cdot (1 - P_{4a}) \cdot P_{56} + P_1 \cdot P_{2a} \cdot (1 - P_{3a}) \times \\ \times (1 - P_{46}) + \\ + P_1 \cdot (1 - P_{2a}) \cdot P_{36} \cdot P_{46} \cdot (1 - P_{56}) + P_1 \times \\ \times (1 - P_{2a}) \cdot P_{36} \cdot (1 - P_{46}) + \\ + P_1 \cdot (1 - P_{2a}) \cdot (1 - P_{36}) \cdot (1 - P_{46}) \cdot P_{56} + P_1 \cdot (1 - P_{2a}) \times \\ \times (1 - P_{36}) \cdot P_{46} \cdot (1 - P_{56}) + \\ + (1 - P_1) \cdot P_{26} \cdot (1 - P_{36}) + (1 - P_1) \cdot P_{26} \cdot P_{36} \cdot (1 - P_{46}) + \\ + (1 - P_1) \cdot P_{26} \cdot P_{36} \cdot P_{46} \cdot (1 - P_{56}) + (1 - P_1) \cdot (1 - P_{26}) \times \\ \times P_{36} \cdot (1 - P_{46}) + \\ + (1 - P_1) \cdot (1 - P_{26}) \cdot P_{36} \cdot P_{46} \cdot (1 - P_{56}) + (1 - P_1) \cdot (1 - P_{26}) \times \\ \times (1 - P_{36}) \cdot P_{46} \cdot (1 - P_{56}) + \\ + (1 - P_1) \cdot (1 - P_{26}) \cdot (1 - P_{36}) \cdot (1 - P_{46}) \cdot P_{56}.$$

Учитывая, что

$$P(S_i) = f(C_j), \quad (8)$$

а качество мониторинга определяется вероятностью правильной реализации его функций P_Σ :

$$P_\Sigma = \Phi\{f(C_j)\}, \quad (9)$$

то задачу мониторинга ГТД можно сформулировать как задачу оптимизации: найти такие затраты C_j , при которых выполняются условия:

$$\begin{cases} \Phi\{f(C_j)\} \geq P_{\Sigma\text{доп}}; \\ C = \sum_j C_j \Rightarrow \min; \end{cases} \quad (10)$$

или

$$\begin{cases} C = \sum_j C_j \leq C_{\Sigma\text{доп}}; \\ P_\Sigma = \Phi\{f(C_j)\} \Rightarrow \max; \end{cases} \quad (11)$$

где $P_{\Sigma\text{доп}}$ – заданный уровень качества процессов мониторинга; $C_{\Sigma\text{доп}}$ – допустимый уровень затрат на процесс мониторинга ГТД.

В дальнейшем задача оптимизации процесса мониторинга авиационного двигателя рассматривается автором в последней постановке (11): при ограничениях по стоимости разрабатываемой экспертной системы необходимо обеспечить высокое качество процесса мониторинга ГТД, т. е. максимизировать эффектив-

ность выполнения каждой функции мониторинга.

Комплекс информационных моделей для динамических баз данных и знаний, которые совместно с решателем и планировщиком образуют ядро будущей экспертной системы, позволяет эффективно и качественно по-новому оценить взаимодействие отдельных подсистем, а также процесс функционирования разрабатываемой экспертной системы.

Комплекс информационных моделей прежде всего показывает информационно-логическое взаимодействие файлов данных в базах данных и знаний экспертной системы.

Информационная модель процесса мониторинга авиационного ГТД в общем виде может быть представлена как:

$$M = \langle F, A, V, P, Q, O, R \rangle, \quad (12)$$

где $F = \{f_i, i = \overline{1, I}\}$ – множество функций процесса мониторинга ГТД;

$A = \{a_j, j = \overline{1, J}\}$ – множество задач (процедур), реализуемых в процессе мониторинга ГТД;

$V = \{v_l, l = \overline{1, L}\}$ – множество измеряемых параметров ГТД;

$Q = \{q_k, k = \overline{1, K}\}$ – множество результатов процессов мониторинга ГТД;

$P = \{p_m, m = \overline{1, M}\}$ – персонал, отвечающий за процесс мониторинга ГТД;

$O = \{o_n, n = \overline{1, O}\}$ – множество объектов и процессов мониторинга ГТД;

$VQ = V \cup Q$ – полное множество информационных элементов процесса мониторинга ГТД;

$R = \{r_s, s = \overline{1, S}\}$ – множество отношений (взаимосвязей) между компонентами $\{F, A, V, Q, P, O\}$.

Информация, описывающая процесс мониторинга авиационного двигателя, представляется в виде совокупности множеств измеряемых параметров и результатов оценки его технического состояния.

Информационная модель процесса мониторинга состояния ГТД приведена на рис. 7. Она показывает последовательность (логику) выполняемых действий при манипулировании с отдельными файлами в базе данных экспертной системы.

Информационная модель процесса мониторинга состояния ГТД приведена на рис. 7. Она показывает последовательность (логику) выполняемых действий при манипулировании с отдельными файлами в базе данных экспертной системы.

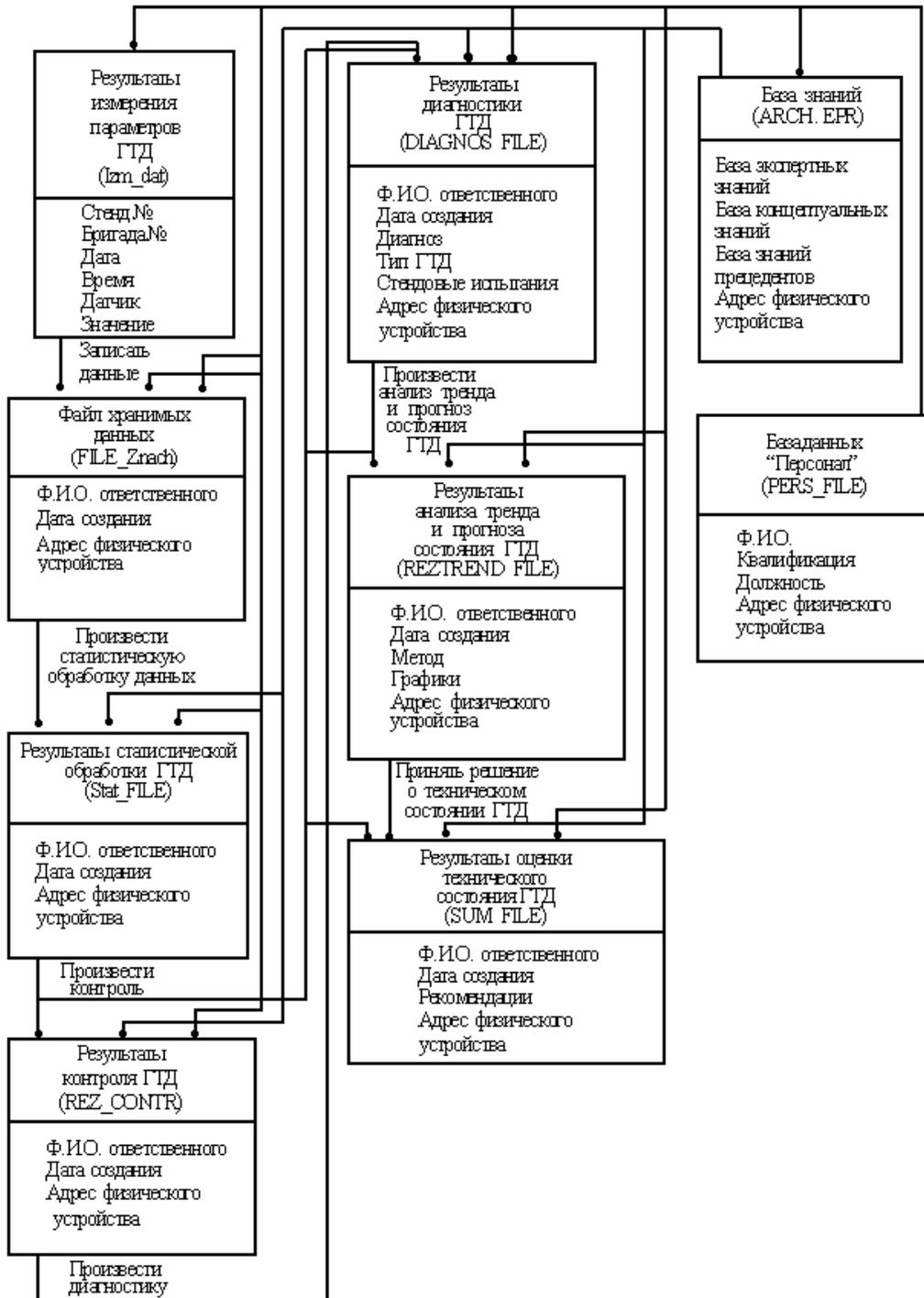


Рис. 7. Информационная модель процессов мониторинга состояния ГТД

Каждый из рассмотренных на рис. 7 информационных объектов определяется значением соответствующих атрибутов: ФИ.О. ответственного за испытания, дата создания файла, адрес физического устройства, на котором находится этот файл, и т. д. Все они взаимодействуют с разнородной базой знаний, содержащей концептуальные и экспертные знания, а также прецеденты.

Процесс взаимодействия разнородных баз знаний экспертной системы мониторинга состояния авиационного ГТД показан на рис. 8. Здесь основным связующим, координационным и вычислительным элементом является решатель, осуществляющий совместно с планировщиком управление процессом взаимодействия между системами управления базами данных и знаний.

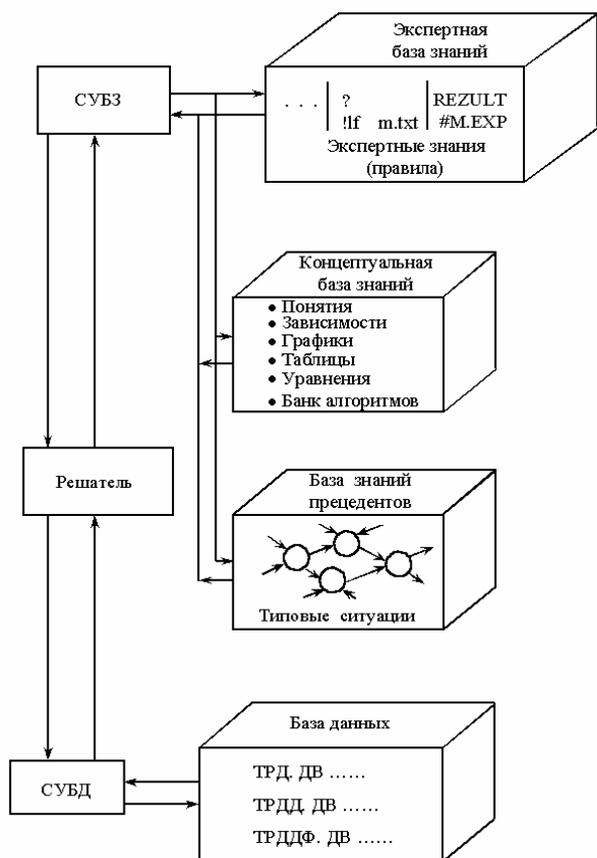


Рис. 8. Взаимодействие разнородных баз знаний и базы данных в процессе мониторинга состояния ГТД с экспертной системой

Содержательной компонентой рассмотренных выше баз знаний являются:

- для экспертной базы знаний (формализованные знания экспертов в виде правил продукций), расширенной элементами нечеткой логики (лингвистическими переменными, отражающими качество процесса мониторинга ГТД);

- для концептуальной базы знаний знания экспертов в виде отдельных понятий предметной области, описываемых уравнениями, таблицами, графиками, а также расширенным банком алгоритмов и т. д.;

- для базы знаний прецедентов – типовые ранее рассмотренные ситуации, формализованные в виде дерева причинно-следственных свя-

зей, типовых алгоритмов, стандартных утилит, процедур вывода и т. д.

Содержательной компонентой баз данных являются:

- данные об испытаниях серийных ГТД;
- индивидуальные характеристики и паспортные данные отдельных двигателей;
- ГОСТы, ОСТы, нормативные отраслевые документы;
- протоколы (отчеты) об испытаниях и т. д.

На рис. 9 показана реляционная, многомерная, временная база данных контроля технического состояния авиационного двигателя, которая хранит результаты контроля, полученные в ходе стендовых испытаний серийных или индивидуальных ГТД. Пользователь на основе МЕНЮ-ориентированного интерфейса – может осуществлять различные запросы к базе данных как для отдельных ГТД и их параметров, так и для группы серийных двигателей. Для этого ему необходимо указать следующую информацию: тип двигателя, серийный номер, номер испытательного стенда, режим испытаний, дату проведения испытаний, какие системы и параметры этих систем контролируются и т. д. На основании введенных данных будет осуществлен поиск информации как по отдельным полям базы данных, так и по группе полей.

Для разработки такой базы данных необходимо сформулировать ряд требований, реализация которых позволит правильно выбрать СУБД и на ее основе осуществить формирование системного проекта и экспертной системы мониторинга состояния ГТД [23–40].

Среди основных требований, предъявляемых к разрабатываемой БД, можно выделить следующие:

- распределенный (сетевой) характер БД;
- удаленный доступ;
- многомерность;
- обработка наряду с классическими и нечеткими запросами;
- исключение информационной избыточности БД;
- обеспечение целостности БД;
- обеспечение функций информационно-поисковой системы;
- МЕНЮ-ориентированный интерфейс.

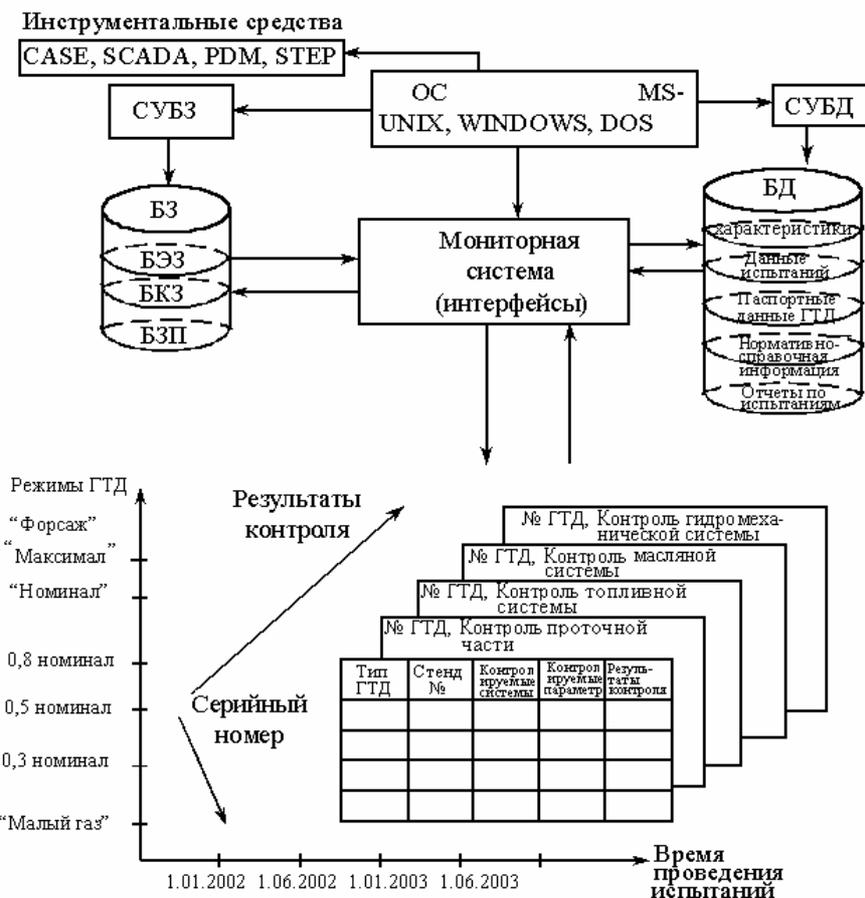


Рис. 9. Многомерная временная база данных контроля состояния ГТД

РАЗРАБОТКА ДИНАМИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ПРОЦЕССА МОНИТОРИНГА СОСТОЯНИЯ АВИАЦИОННОГО ГТД

Целью создания динамической модели является отработка логики функционирования и взаимодействия планировщика, решателя и баз знаний экспертной системы в процессе мониторинга состояния авиационного ГТД.

Сценарий функционирования разрабатываемой экспертной системы показан на рис. 10–11. Логика ее работы (на основе условных операторов $A_1 \dots A_5$) приведена ниже.

Рассмотрим процесс функционирования разрабатываемой экспертной системы мониторинга состояния ГТД. Измеренные в процессе стендовых испытаний параметры авиационного двигателя нормируются, калибруются, масштабируются и записываются во временную базу данных «Испытания ГТД» в виде отдельного файла. В случае возникновения нештатной ситуации (потеря всей или части измеренной информации вследствие помех, шумов, сбоев и т. д.) в проектируемой экспертной системе предусмотрена возможность перезаписи дан-

ных. Для этого процесс измерений распараллеливается (дублируется) и данные измерений одновременно записываются в несколько файлов. Далее осуществляется покомпонентное сравнение всех записей файла в базе данных и временного файла, хранимого, например, на сервере бригады «Надежности», проводившей испытания ГТД. В случае полного совпадения временный файл уничтожается, в противном случае данные из этого файла копируются в базу данных «Испытания ГТД».

Следующим этапом процесса мониторинга авиационного двигателя, выполняемым экспертной системой, является статистическая обработка данных измерений, с целью выявления аномальных данных. Для этих целей экспертная система использует стандартные библиотеки программ-утилит среды STATISTICA, позволяющей применять корреляционный, факторный, кластерный и другие методы анализа данных.



Рис. 10. Алгоритм мониторинга состояния ГТД: A_1 – данные записаны верно, продублированы, имеют доступ и защищены от несанкционированного доступа; A_2 – результаты статистической обработки выполнены в соответствии с заданными требованиями; A_3 – можно сделать однозначный вывод о состоянии ГТД: $y_3 = 01$ – ГТД исправен; $y_3 = 10$ – ГТД неисправен; $y_3 = 00$ – нельзя сделать выводы

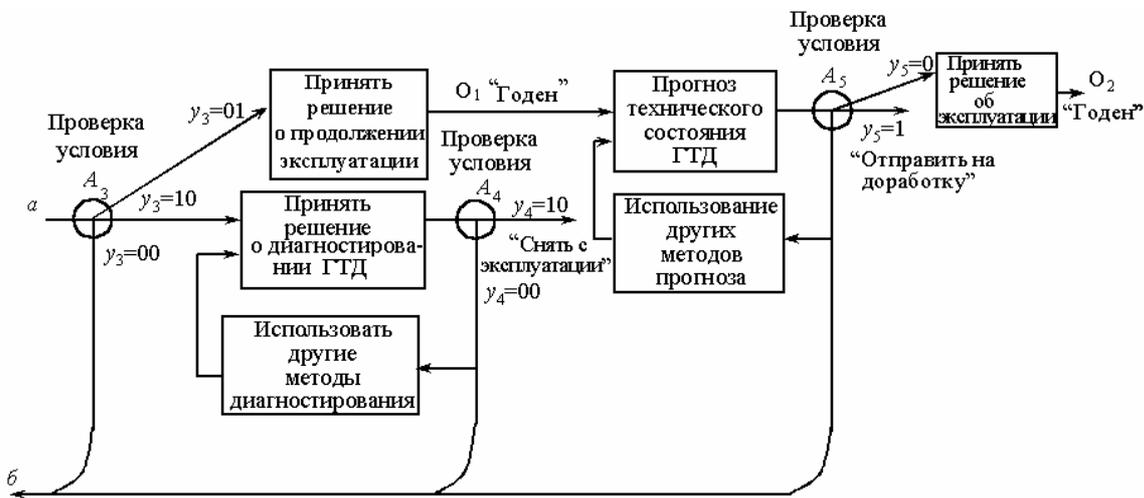


Рис. 11. Алгоритм мониторинга состояния ГТД: A_4 – можно сделать вывод о техническом состоянии ГТД: $y_4 = 01$ – ГТД исправен; $y_4 = 10$ – ГТД неисправен с локализацией места отказа; $y_4 = 00$ – нельзя сделать выводы; A_5 – можно сделать вывод о результатах прогноза технического состояния ГТД: $y_5 = 00$ – ГТД исправен в будущие моменты времени его функционирования; $y_5 = 1$ – ГТД неисправен в будущие моменты времени его функционирования

В соответствии с логикой работы проектируемой экспертной системы (условие A_2): если в процессе статистической обработки данных применяемый метод не удовлетворяет заданным требованиям, например метод наименьших квадратов, то он может быть заменен любым альтернативным или новым методом (включенным в среду экспертной системы по желанию пользователя), с учетом дополнительных данных из базы данных «Испытания ГТД».

Если требования статистической обработки данных полностью выполнены, то экспертная система осуществляет контроль технического состояния ГТД в соответствии с условием A_3 . Следует отметить, что наиболее распространенным методом контроля является метод допускового контроля [41–45]. Если в процессе

контроля экспертная система не может сделать однозначный вывод о состоянии ГТД, то, как и в случае статистической обработки данных, она переходит к использованию альтернативного метода контроля, например, контроля по переменным допускам или нечетким правилам с применением нейросетевых методов и т. д., т. е. происходит плавный переход от количественных моделей к качественным с использованием методов искусственного интеллекта, а они, как и на предыдущем шаге, могут потребовать дополнительных данных из базы данных «Испытания ГТД». Если в процессе контроля авиационного двигателя экспертная система делает вывод о его исправности, то последней принимается решение о дальнейшей эксплуатации ГТД с последующим решением задачи

прогноза его технического состояния. Если в процессе контроля технического состояния ГТД экспертная система может сделать однозначный вывод о неисправности его технического состояния, то следующим логическим шагом является локализация места проявления отказа. Для этого экспертной системой решается задача диагностики. В процессе решения этой задачи экспертной системой возможны следующие решения:

- двигатель исправен и принимается решение о продолжении его эксплуатации;
- двигатель неисправен и принимается решение о снятии его с эксплуатации;
- нельзя сделать однозначного вывода о состоянии ГТД и в этом случае экспертная система будет использовать другие диагностические методы, например, метод диагностических матриц, метод уравнивания, какой-либо другой альтернативный метод или методы, учитывающие качественное изменение характеристик ГТД (методы искусственного интеллекта), а они, как и в процессе контроля, могут потребовать дополнительных данных из базы данных «Испытания ГТД».

Если в процессе контроля и диагностики технического состояния ГТД экспертная система принимает решение «Годен», то в дальнейшем она осуществляет прогноз состояния авиационного двигателя, по результатам которого проверяется условие A_5 (рис. 11).

Если в процессе прогноза экспертная система принимает решение «Годен в будущие моменты времени его функционирования», то принимается окончательное решение о годности ГТД и его дальнейшей эксплуатации. В противном случае авиационный двигатель отправляется на доработку. Если в процессе прогноза технического состояния авиационного двигателя экспертная система не может сделать однозначный вывод о результатах прогноза, то она, как и на предыдущих шагах (статистической обработки, контроля, диагностики), использует другие методы прогноза, например, скользящего среднего, экспоненциального сглаживания или методы искусственного интеллекта, где, как уже отмечалось выше, могут быть востребованы дополнительные данные из базы данных «Испытания ГТД».

К интерфейсу экспертной системы предъявляются следующие требования:

- МЕНЮ-ориентированный интерфейс, определяющий последовательность решаемых экспертной системой задач мониторинга параметров ГТД;

- автономный режим работы (пользовательский режим);

- режим работы с экспертом (работа с базой знаний).

Основными требованиями к базе знаний являются:

- разнородный (гибридный) характер обрабатываемых знаний (семантические сети, фреймы, продукции);
- реализация нечетких правил;
- гибридный характер представления знаний (концептуальные, экспертные, база знаний прецедентов; нейросетевые базы знаний);
- исключение информационной избыточности знаний в базе знаний;
- динамизм пополнения знаний в базе знаний (нейросети при необходимости могут дообучаться в режиме реального времени);
- возможность взаимодействия с другими базами знаний;
- обобщение знаний и формирование объяснений на основе вычислительной модели.

ТРЕБОВАНИЯ К ЭКСПЕРТНОЙ СИСТЕМЕ МОНИТОРИНГА СОСТОЯНИЯ АВИАЦИОННОГО ГТД НА ОСНОВЕ IDEF-МОДЕЛЕЙ

Совокупность функциональной информационной, динамической моделей, а также глоссария процесса мониторинга ГТД образуют системный проект (рис. 12–13). Анализ этих рисунков позволяет правильно построить экспертную систему и разработать для нее соответствующие требования, реализация которых позволит эффективно и качественно осуществлять процесс мониторинга состояния авиационного двигателя.

Глоссарий (словарь баз данных и знаний) автоматически формируется в процессе создания экспертной системы и ее подсистем в виде динамического файла, в частности, при разработке баз данных и знаний, а также при реализации соответствующих запросов, на основе которых и формируется этот файл. Он является связующим звеном всех компонент экспертной системы и на его основе в дальнейшем реализуется логика взаимодействия информационной и динамической моделей с базами данных и знаний. Один из вариантов такого взаимодействия показан на рис. 13. Структура разрабатываемой экспертной системы приведена на рис. 14.

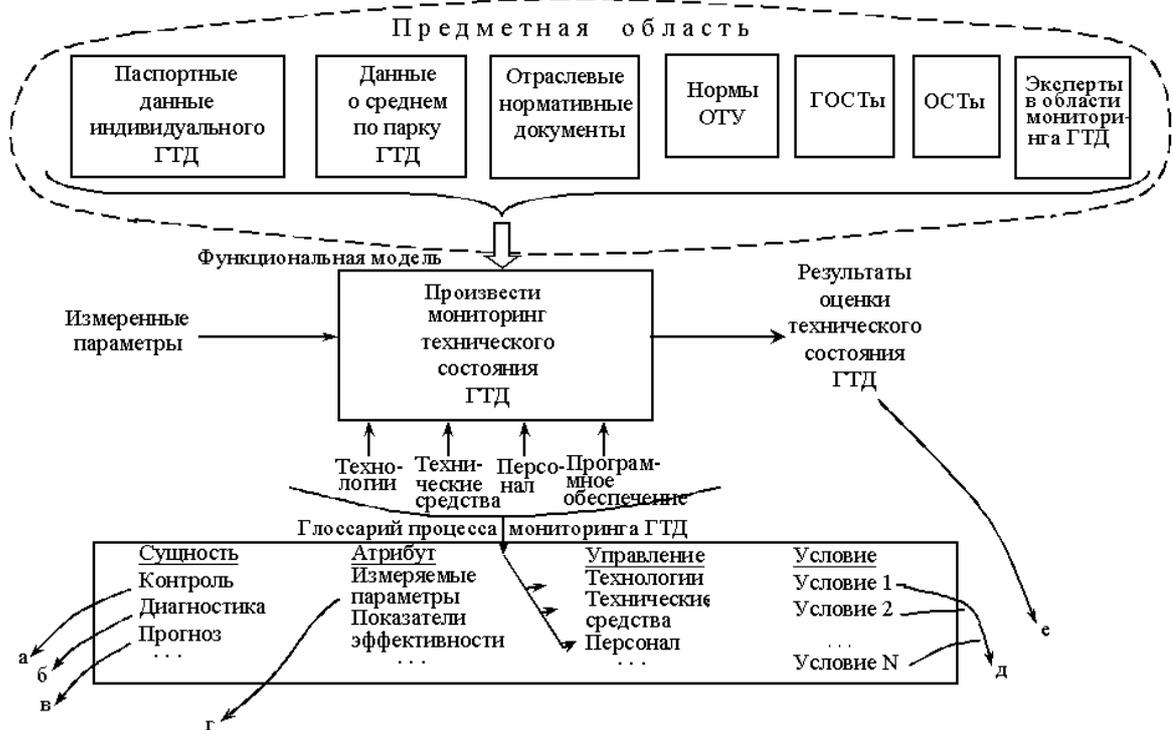


Рис. 12. Взаимосвязь системного проекта мониторинга состояния ГТД с базой знаний экспертной системы

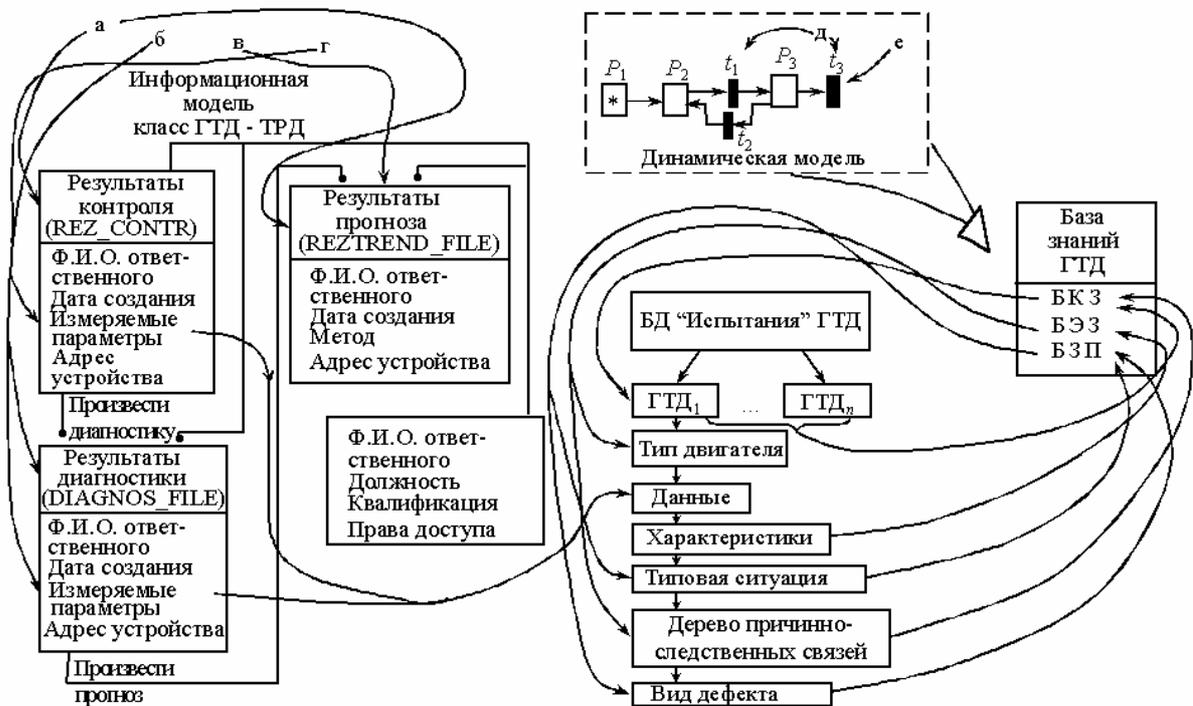


Рис. 13. Взаимосвязь системного проекта мониторинга состояния ГТД с базой знаний экспертной системы

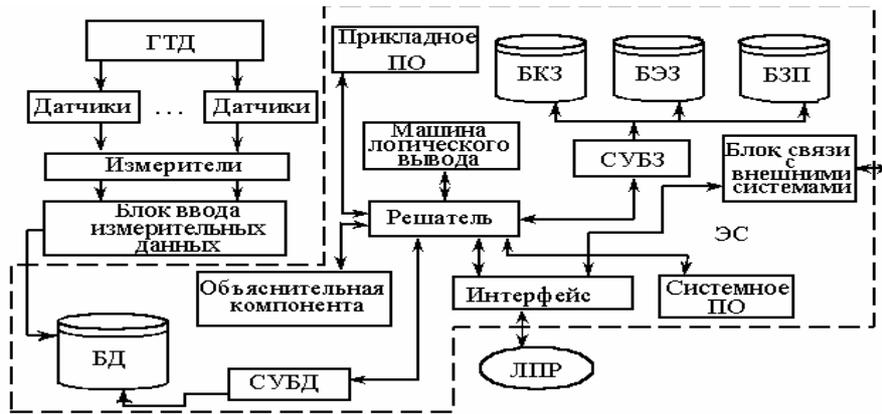


Рис. 14. Структура экспертной системы мониторинга состояния ГТД: БД – база данных; СУБД – система управления базой данных; БКЗ – база концептуальных знаний; БЭЗ – база экспертных знаний; БЗП – база знаний прецедентов; СУБЗ – система управления базами знаний; ПО – программное обеспечение; ЛПР – лицо, принимающее решение

Основные уровни иерархии типовых задач в базе знаний экспертной системы, приведенной на рис. 14, могут быть с точки зрения мониторинга состояния ГТД представлены как:

- 1) обработка результатов измерений;
- 2) регистрация и отображение результатов;
- 3) контроль, диагностика, прогноз технического состояния ГТД;
- 4) принятие решения о техническом состоянии ГТД.

Задачи обработки результатов измерений связаны с вычислением косвенных значений физических параметров, которые определяются набором исходных данных (измерений) и конкретной процедурой обработки.

Задачи регистрации и отображения заключаются в регистрации в БД ЭС отсчетов, данных измерений, прямых и косвенных параметров.

Задачи контроля, диагностики и прогнозирования предполагают формирование информации о правильности функционирования ГТД в процессе испытаний, локализации возможного отказа, прогнозирование изменения основных характеристик авиационного двигателя в процессе эксплуатации.

Решение этих задач определяется набором исходных данных (результатами измерений, прямыми и косвенными параметрами и т. д.), конкретными методами, методиками и алгоритмами контроля, диагностики и прогнозирования.

Задачи принятия решения о техническом состоянии ГТД решаются персоналом, проводящим испытания авиационного двигателя, на основе информации, полученной экспертной системой на предыдущих этапах.

На основе рис. 12, 13 и 14 сформулируем требования к разрабатываемой экспертной системе мониторинга состояния авиационного ГТД:

- реализация функций мониторинга в экспертной системе на основе функциональной модели мониторинга ГТД;
- разработка баз данных и знаний на основе информационных и динамической моделей мониторинга ГТД;
- возможность работы не только с количественной, но и с качественной информацией (нечеткие данные, шумы измерений, сбои и т. д.);
- гибридность баз знаний (базы концептуальных и экспертных знаний, базы знаний прецедентов; нейросетевые базы знаний);
- МЕНЮ-ориентированный интерфейс;
- протоколирование работы пользователя (сбор статистики);
- модификация баз знаний (режим эксперта);
- реализация FDI-метода, позволяющего на основе вектора отклонений между измеренными параметрами индивидуального ГТД и его расчетными значениями по адекватной математической модели в базе концептуальных знаний локализовать место отказа в процессе мониторинга двигателя;
- возможность функционального расширения экспертной системы программами-утилитами пользователя;
- клиент-серверная архитектура, удаленный доступ к сети распределенных экспертных систем;
- интеллектуальная поддержка автоматизированных рабочих мест (АРМов);

- открытость и расширяемость экспертной системы;
- поддержка объектно-ориентированной парадигмы и новых информационных технологий (CASE, CALS, SCADA, PDM, STEP и т. д.).

ВЫВОДЫ

1. Предложен подход к формализации процессов информационного мониторинга технического состояния авиационного ГТД на основе методологии системного анализа и IDEF-технологий.

2. Разработан комплекс функциональных моделей процессов мониторинга авиационного двигателя на основе технологии IDEF0, что позволило выделить основной спектр задач и сформулировать требования к их реализации в составе экспертной системы мониторинга технического состояния ГТД.

3. Разработан комплекс информационных моделей процесса мониторинга технического состояния авиационного двигателя на основе технологии IDEF/1X, что позволило определить логическую структуру и механизмы взаимодействия баз данных и баз знаний в составе разрабатываемой экспертной системы мониторинга ГТД.

4. Построена динамическая модель процессов мониторинга технического состояния авиационного двигателя на основе IDEF/CPN, что позволило определить требования к механизму логического вывода в процессе выполнения функций мониторинга экспертной системой.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. CALS в авиастроении / А. Г. Братухин [и др.]. М.: МАИ, 2000. 300 с.
2. Управление динамическими системами в условиях неопределенности / С. Т. Кусимов [и др.]. М.: Наука, 1998. 452 с.
3. Проблемы проектирования и развития систем автоматического управления и контроля ГТД / С. Т. Кусимов [и др.]. М.: Машиностроение, 1999. 609 с.
4. ГОСТ 20911-89. Техническая диагностика. Термины и определения М.: Изд-во стандартов, 1989. 22 с.
5. ГОСТ 27002-89. Надежность в технике. Основные понятия, термины и определения М.: Изд-во стандартов, 1989. 36 с.
6. ГОСТ 27518-87. Техническая диагностика. Показатели диагностирования М.: Изд-во стандартов, 1990. 16 с.
7. ГОСТ 8.009-84 ГСИ. Нормируемые метрологические характеристики средств измерений М.: Изд-во стандартов, 1984. 16 с.

8. ГОСТ 8.326-89. Метрологическая аттестация средств измерений М.: Изд-во стандартов, 1990. 14 с.

9. ГОСТ 34-602.89. Информационная технология. Комплекс стандартов и руководящих документов на автоматизированные системы М.: Изд-во стандартов, 1991. 142 с.

10. ГОСТ 19.701-90. (ИСО 5807-85). Схемы алгоритмов, программ, данных и систем. Условные обозначения и правила выполнения М.: Издательство стандартов, 1990. 17 с.

11. МИ 2174-91. Рекомендация. Аттестация алгоритмов и программ обработки данных при измерениях. Основные положения. СПб.: НПО ВНИИМ им. Д. И. Менделеева, 1993. 34 с.

12. МУ 175-88. Метрологическое обеспечение испытаний газотурбинных двигателей. Метрологическая аттестация измерительных каналов информационно-измерительных систем, используемые при испытаниях ГТД на неустановившихся режимах. М.: Минавиапром, 1989. 8 с.

13. Надежность в технике. Термины и определения. ГОСТ 27.002.-89 М.: Изд-во стандартов, 1990. 36 с.

14. **Арсеньев Б. П., Яковлев С. А.** Интеграция распределенных баз данных. СПб.: Лань, 2001. 464 с.

15. **Васильев В. И., Жернаков С. В.** Экспертные системы: управление эксплуатацией сложных технических объектов. Уфа: УГАТУ, 2003. 106 с.

16. **Вендров А. М.** CASE-технологии. Современные методы и средства проектирования информационных систем. М: Финансы и статистика, 1998. 176 с.

17. **Калянов Г.Н.** CASE-технологии: Консалтинг в автоматизации бизнес процессов. М.: Горячая линия, 2000. 320 с.

18. **Черпаков Б. И.** Компьютерно-интегрированные производства и CALS-технологии в машиностроении. М.: ВИМИ, 1999. 512 с.

19. Структурный анализ систем: IDEF-технологии / С. В. Черемных [и др.]. М.: Финансы и статистика, 2001. 208 с.

20. **Смирнов Н. Н., Ицкович А. А.** Обслуживание и ремонт авиационной техники по состоянию. М.: Транспорт, 1987. 272 с.

21. Техническая эксплуатация летательных аппаратов / Н. Н. Смирнов [и др.]. М.: Транспорт, 1990. 423 с.

22. Устройство и летная эксплуатация силовых установок / Б. А. Соловьев [и др.]. М.: Транспорт, 1991. 256 с.

23. **Арсеньев Б. П., Яковлев С. А.** Интеграция распределенных баз данных. СПб.: Лань, 2001. 464 с.

24. **Герасименко В. А.** Защита информации в автоматизированных системах обработки данных. М.: Энергоатомиздат, 1994, кн. 1. 400 с.

25. **Григорьев Ю. А., Ревунков Г. И.** Банки данных. М.: МГТУ, 2002. 320 с.

26. Дулин С. К., Киселев И. А. Структуризация знаний в системах мониторинга // Известия АН. Теория и системы управления. 1999. № 5. С. 28–33.
27. Дунаев С. Б. Доступ к базам данных и техника работы в сети. М.: ДИАЛОГ-МИФИ, 1999. 416 с.
28. Замулин А. В. Системы программирования баз данных и знаний. Новосибирск: Наука, 1990. 352 с.
29. Базы данных. Интеллектуальная обработка информации / В. В. Корнеев [и др.]. М.: Нолидж, 2000. 325 с.
30. Выявление экспертных знаний / О. И. Ларичев [и др.]. М.: Наука, 1989. 128 с.
31. Системы управления базами данных и знаний / А. Н. Наумов [и др.]. М.: Финансы и статистика, 1991. 352 с.
32. Осуга С. Обработка знаний. М.: Мир, 1989. 293 с.
33. Осуги С., Сазки Ю. Приобретение знаний. М.: Мир, 1990. 304 с.
34. Павлов С. В. Системы обработки и хранения информации для контроля и прогнозирования состояния авиакосмических и экологических объектов на основе концепции многомерных баз данных: автореферат дисс. на соиск. уч. ст. д-ра техн. наук. Уфа: УГАТУ, 1998. 34 с.
35. Статические и динамические экспертные системы / Э.В. Попов [и др.]. М.: Финансы и статистика, 1996. 320 с.
36. Поспелов Г. С. Искусственный интеллект – основа новой информационной технологии. М.: Наука, 1988. 280 с.
37. Базы и банки данных и знаний / Г. И. Ревунков [и др.]. М.: Высшая школа, 1992. 367 с.
38. Рыбина Г. В. Интегрированные экспертные системы: современное состояние, проблемы и тенденции // Известия АН. Теория и системы управления. 2002. № 5. С. 111–126.
39. Федунев Б. Е. Проблемы разработки бортовых оперативно-советующих экспертных систем для антропоцентрических объектов // Изв. РАН. Теория и системы управления. 1996. № 5. С. 147–159
40. Харрингтон Д. Л. Проектирование реляционных баз данных. М.: Лори, 2000. 230 с.
41. Диагностика состояния ВРД по термогазодинамическим параметрам / А. М. Ахмедзянов [и др.]. М.: Машиностроение, 1983. 206 с.
42. Концепция управления состоянием сложных технических комплексов за пределами плановых сроков эксплуатации / И. В. Бармин [и др.] // Информационные технологии. 2000. № 5. С. 2–7.
43. Биргер И. А. Техническая диагностика. М.: Машиностроение, 1978. 250с.
44. Идентификация и диагностика в информационно-управляющих системах авиакосмической энергетики / Б. В. Боев [и др.]. М.: Наука, 1988. 168 с.
45. Автоматический контроль и диагностика систем управления силовыми установками летательных аппаратов / В. И. Васильев [и др.]. М.: Машиностроение, 1989. 240 с.

ОБ АВТОРЕ



Жернаков Сергей Владимирович, зав. каф. инф.-изм. техники. Дипл. инж. по пром. электронике (УГАТУ, 1984). Д-р техн. наук по системн. анализу, управлению и обработке информации (УГАТУ, 2005). Иссл. в обл. интеллектуальных систем.