

УДК 681.5:621.452

В. И. ВАСИЛЬЕВ, С. С. ВАЛЕЕВ

## ПРОЕКТИРОВАНИЕ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫХ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ ГТД НА ОСНОВЕ ПРИНЦИПА МИНИМАЛЬНОЙ СЛОЖНОСТИ

Решается задача разработки методологических и теоретических основ проектирования интеллектуальных систем управления сложными динамическими объектами на основе системного анализа и структурной оптимизации иерархических уровней управления с использованием принципа минимальной сложности. Рассмотрены особенности реализации предложенных подходов при построении интеллектуальных систем управления авиационными двигателями. *Интеллектуальные системы управления; сложные технические объекты; теоретико-информационный подход, газотурбинные двигатели*

В настоящее время проблема проектирования систем автоматического управления динамическими объектами характеризуется переходом от парадигмы адаптивного управления к парадигме интеллектуального управления. Это вызвано как непрерывным усложнением объектов управления и условий их функционирования, появлением новых классов вычислительных средств (в частности, распределенных вычислительных систем), высокопроизводительных каналов телекоммуникаций, так и резким повышением требований к надежности и эффективности процессов управления в условиях существенной априорной и апостериорной неопределенности. Учет вышеперечисленных факторов является возможным только на основе перехода от «жестких» алгоритмов параметрической и структурной адаптации к антропоморфному принципу формирования управления.

Интеллектуальное управление является междисциплинарной предметной областью, в которой тесно переплетаются задачи и методы их решения, разработанные в теории исследования операций, современной теории управления сложными динамическими объектами и теории искусственного интеллекта, что обуславливает внутреннюю сложность решения проблем в данной предметной области, так как в ней не только сохраняются проблемы научных областей «доноров», но и появляются новые нерешенные проблемы, вызванные синергетическим эффектом их взаимодействия.

Одним из перспективных направлений в теории интеллектуальных систем управления (ИСУ) сложными динамическими объектами является разработка теоретико-информационного подхода к построению этих систем на основе принципа *IPDI (Increasing Precision with Decreasing Intelligence)*, предложенного Дж. Кардусом (США), суть которого заключается в декомпозиции целей и задач управления сложным динамическим объектом в зависимости от требуемой точности и интеллектуальности выработки управляющих воздействий [1]. При этом, чем выше требуемая точность управления на иерархическом уровне, тем ниже его уровень интеллектуальности; и наоборот, чем выше требуемый уровень интеллектуальности, тем ниже требуемая точность выработки управления.

Вместе с тем, концепция, методология и методы проектирования ИСУ сложными техническими объектами до настоящего времени практически не разработаны. Это в полной мере относится к такому важному классу сложных динамических объектов, к которым относятся современные и перспективные газотурбинные двигатели (ГТД). К нерешенным задачам относятся задачи иерархической декомпозиции ИСУ ГТД в рамках подхода *IPDI* и обеспечения оптимального взаимодействия между различными уровнями иерархии ИСУ. Не разработаны принципы комбинированного применения классических (как правило, линейных) алгоритмов управления и интеллектуальных алгоритмов, (основанных на использовании нечеткой логики, нейронных сетей, генетических алгоритмов), при построе-

нии ИСУ ГТД. Не решена задача оптимизации структуры и параметров интеллектуальных регуляторов на различных уровнях иерархии ИСУ ГТД. Оценку эффективности иерархической ИСУ ГТД как проектного решения в целом также можно отнести к нерешенным задачам в рассматриваемом контексте.

При использовании известных подходов к проектированию системы автоматического управления (САУ) динамическими объектами, к их основным обобщенным характеристикам обычно относят: цели управления; качество достижения этих целей; вычислительные ресурсы, требуемые для достижения поставленных целей с заданным качеством, или сложность САУ; объем трудозатрат (сроки), необходимые для разработки САУ, или сложность процесса проектирования САУ. Поскольку требования к характеристикам САУ перспективных ГТД постоянно растут, то показатели сложности системы и сложности процесса ее проектирования становятся ключевыми характеристиками, определяющими в конечном итоге качество проектных решений и эффективность функционирования САУ ГТД.

Исследования в области оценки и оптимизации сложности САУ динамическими объектами имеют полувековую историю. Впервые это понятие ввел У. Р. Эшби, предложивший так называемый принцип необходимого разнообразия в качестве базового принципа построения САУ [2]. В работах В. В. Солодовникова эта идея получила свое дальнейшее развитие в виде принципа минимальной сложности, составляющего основу проектирования САУ динамическими объектами. В. И. Васильевым и Ф. А. Шаймардановым данный принцип был использован при разработке метода порядкового отображения для решения задачи структурного синтеза многосвязных линейных САУ [3]. Вместе с тем, перечисленные подходы не содержат формальных алгоритмов и методик синтеза ИСУ ГТД и их подсистем на основе критерия минимальной сложности при выполнении заданных требований к качеству процессов управления в условиях неопределенности режимов работы ГТД и изменения внешней среды.

## 2. КОНЦЕПЦИЯ ПОСТРОЕНИЯ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ГТД

На основе анализа принципов, методов и алгоритмов построения интеллектуальных

систем управления сложными динамическими объектами (с учетом тенденций развития систем управления ГТД, как важного класса этих объектов) можно сформулировать базовую концепцию построения перспективных ИСУ ГТД, основанную на применении основополагающих системных принципов:

1) *принцип функциональной интеграции*, предполагающий создание *интегрированной* системы управления силовой установкой и летательного аппарата (ЛА) на основе координации и согласования режимов работы воздухозаборника, ГТД, реактивного сопла и ЛА, выбора оптимальных программ управления силовой установкой (исходя из критериев экономии топлива, обеспечения максимальной маневренности, управления в нештатных ситуациях и т. п.);

2) *принцип иерархической организации*, означающий построение системы управления в классе *многоуровневых иерархических* систем управления с разделением (декомпозицией) ее на уровни, отличающиеся выбором целей управления и методами реализации:

- *уровень планирования*, обеспечивающий выбор глобальной цели управления, ее коррекцию при изменении текущей ситуации управления (и, в том числе, при возникновении нештатных ситуаций), оптимизацию выбора программ управления и обеспечение информационного обмена с САУ ЛА, анализ и прогноз ситуации управления в условиях неопределенности;

- *уровень координации*, обеспечивающий адаптацию характеристик САУ ГТД к изменениям внешней и внутренней обстановки (условий полета, внешних возмущений, отказов аппаратуры и т. д.), координацию работы подсистем нижнего уровня и реконфигурацию этих подсистем при изменении ситуации управления;

- *исполнительный уровень*, обеспечивающий управление ГТД как многосвязным нелинейным динамическим объектом и его подсистемами на множестве штатных и возможных нештатных режимов;

3) *принцип комплексирования моделей, методов и алгоритмов анализа и синтеза* многофункциональных САУ ГТД, заключающийся в применении как классических методов теории многосвязных САУ, так и методов интеллектуального управления сложными динамическими объектами на основе нейронных сетей, нечеткой логики, генетических алгоритмов и др.;

4) принцип минимальной сложности, предполагающий выбор наиболее простой структуры алгоритмов ИСУ ГТД с учетом изменения режимов работы ГТД и условий полета ЛА при оптимальном использовании информационных и вычислительных ресурсов системы управления;

5) принцип построения открытых информационных систем в качестве основы интеллектуализации и стандартизации технологий обработки информации на различных этапах жизненного цикла ИСУ ГТД.

Для корректной постановки и решения задач проектирования интегрированных ИСУ ГТД в рамках предложенной концепции требуется разработка универсальных моделей, алгоритмов и методик анализа, синтеза и исследования этих систем, обеспечивающих минимизацию сложности проектных решений на основе энтропийного подхода к оценке и оптимизации показателей качества и сложности алгоритмов управления ГТД.

### 3. ТЕОРЕТИКО-ИНФОРМАЦИОННЫЙ ПОДХОД К ПРОЕКТИРОВАНИЮ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫХ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ ГТД

Для анализа особенностей каждого из иерархических уровней ИСУ ГТД как информационных каналов передачи, хранения и обработки информации предлагается обобщенная информационная модель ИСУ в виде виртуальной вычислительной машины, включающей в себя память, вычислитель и каналы обмена информацией [4].

На рис. 1 представлены основные компоненты обобщенной информационной модели ИСУ, где  $L_{ВС}$  — длина виртуальной программы, с помощью которой генерируются состояния окружающей среды (делается допущение, что она конечна);  $S_{ВС}$  — код состояния внешней среды;  $L_{В}$  — длина программы, осуществляющей сбор информации об окружающей среде, т. е. измерение внешних возмущений ( $L_{В} < L_{ВС}$ );  $S_{В}$  — код состояния внешней среды, доступной для распознавания;  $L_{р}$  — длина программы, генерирующей множество состояний ИСУ ГТД (алгоритм управления);  $S_{р}$  — код состояния ИСУ;  $L_{О}$  — длина программы, генерирующей состояния ГТД как объекта управления;  $S_{О}$  — код состояния САУ ГТД;  $L_{S}$  — длина программы, осуществляющей сбор (измерение) информации о состоянии объекта;  $S_{S}$  — код наблюдаемого состояния управления объекта;  $В$  — виртуальный вычислитель, выполняющий коды программ  $L_{В}$ ,  $L_{р}$ ,  $L_{S}$ .

Предложенная информационная модель ИСУ ГТД позволяет рассматривать решение задач управления с точки зрения их информационного содержания, а также оценить комбинаторную сложность состояния внешней среды, алгоритмическую сложность ИСУ и объекта управления и сформулировать, в конечном итоге, требования к обобщенным информационным характеристикам проектируемой ИСУ ГТД.

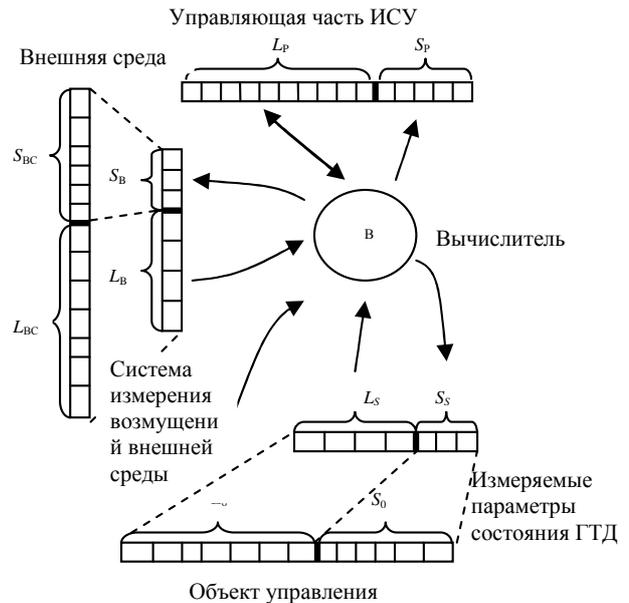


Рис. 1. Информационная модель ИСУ ГТД

Далее поставим задачу построения отображения  $\pi$  из пространства ситуаций управления (множество ситуаций управления определяется состоянием объекта управления, состоянием внешней среды и целью управления) в пространство алгоритмов управления ИСУ ГТД. Отображение  $\pi = (\pi_1, \pi_2, \pi_3)$  характеризует процедуру синтеза управляющих алгоритмов ИСУ ГТД с декомпозицией ее на основе принципа IPDI на три соподчиненных уровня управления:

- < Объект управления >  $\pi_1$
- < Алгоритмы исполнительного уровня (ИУ) >;
- < Внешняя среда >  $\pi_2$
- < Алгоритмы уровня координации (УК) >;
- < Цель управления >  $\pi_3$
- < Алгоритмы уровня планирования (УП) >.

Сложность полученных проектных решений ИСУ при этом должна соответствовать сложности рассматриваемой ситуации управления. В качестве меры сложности ситуации управления в данном случае можно воспользоваться энтропийными оценками

$$\pi_1 : H(Y/U, F) \rightarrow$$

Сложность алгоритмов ИУ | Энтропия как мера

$$\pi_2 : H(F) \rightarrow$$

Сложность алгоритмов УК }  $\Rightarrow$  сложности

$$\pi_3 : H(G) \rightarrow$$

Сложность алгоритмов УП | проектного решения.

Здесь  $H(Y/U, F)$  — энтропия процессов управления ГТД на ИУ ИСУ;  $H(F)$  — энтропия изменения внешней среды;  $H(G)$  — энтропия изменения целей управления;  $Y, U, F, G$  — соответственно векторы измеряемых параметров ГТД, управляющих воздействий, внешних возмущений, целей.

Энтропия вектора выходных параметров ГТД в данном случае определяется как

$$H(Y/U, F) = - \int_{\Gamma_Y}^p (Y/U, F) \ln p(Y/U, F) dY,$$

где  $p(Y/U, F)$  — плотность распределения вероятностей компонент вектора  $Y$ . Энтропия изменения состояния внешней среды оценивается выражением

$$H(F) = - \int_{\Gamma_F} p(F) \ln p(F) dF,$$

где  $p(F)$  — плотность распределения вероятностей вектора внешних возмущений  $F$ . Энтропия целей управления  $H(G)$  оценивается аналогично.

С учетом вышеизложенного, задача оптимального синтеза 3-уровневой ИСУ ГТД на основе энтропийного подхода формулируется следующим образом [3].

**Постановка задачи.** Требуется найти такой способ построения ИСУ:  $U_{\text{opt}} = f(Y, F, G)$ , т. е. определить состав алгоритмов управления, структуру базы данных (БД) и базы знаний (БЗ) на различных уровнях системы управления, чтобы выполнялось требование  $\|Y - G\| \leq \varepsilon$ , где  $G$  — вектор целей управления;  $\varepsilon$  — заданная погрешность поддержания выходных координат объекта по отношению к компонентам вектора целей  $G$ , при соблюдении ограничения

$$H_{\Sigma}(A) \rightarrow \min. \quad (1)$$

Здесь  $H_{\Sigma}(A)$  — суммарная энтропия множества управляющих алгоритмов ( $A$ ) для всех уровней управления ИСУ, которая в силу относительной независимости и разнотемповости этих уровней может быть подсчитана как

$$H_{\Sigma}(A) = H(A)_{\text{ИУ}} + H(A)_{\text{УК}} + H(A)_{\text{УП}}, \quad (2)$$

где  $H(A)_{\text{ИУ}}$ ,  $H(A)_{\text{УК}}$ ,  $H(A)_{\text{УП}}$  — соответственно значения энтропии (вычислительной сложности) алгоритмов управления, реализуемых на ИУ, УК и УП ИСУ.

Предложенная методика решения задачи синтеза ИСУ ГТД основана на использовании энтропийного подхода и заключается в следующем.

**Шаг 1.** Задаются цели управления  $G = G^*$  и состояние внешней среды  $F = F^*$ .

**Шаг 2.** Выполняется синтез алгоритмов управления ИУ ИСУ из условия минимума энтропии  $H(A)_{\text{ИУ}} \rightarrow \min$  и ограничения на величину энтропии вектора выходов ГТД:  $H(Y/U, F^*) \leq H_{1\text{доп.}}$ ;  $\forall X \in \Gamma_{X_1}$ ;  $Y \in \Gamma_{Y_1}$ ;  $U \in \Gamma_U$ , где  $H_{1\text{доп.}}$  — допустимый уровень энтропии, определяемый требованиями к точности поддержания режимов работы ГТД;  $\Gamma_{X_1}$ ,  $\Gamma_{Y_1}$  и  $\Gamma_U$  — соответственно области переменных состояния ГТД для нормальных (штатных) режимов его функционирования, область возможных значений выходных параметров ГТД при его нормальном функционировании, а также область возможных (допустимых) управлений.

**Шаг 3.** Фиксируется  $G = G^*$ , принимается  $F \in \Gamma_F$ , где  $\Gamma_F$  — область возможных значений возмущающих воздействий.

**Шаг 4.** Производится синтез алгоритмов УК ИСУ из условия

$$H(A)_{\text{УК}} \rightarrow \min$$

и ограничений на величину энтропии вектора выходов объекта  $H(Y/U, F) \leq H_{2\text{доп.}}$ ;  $\forall X \in \Gamma_{X_2}$ ;  $Y \in \Gamma_{Y_2}$ ;  $U \in \Gamma_U$ , где  $H_{2\text{доп.}}$  — допустимый уровень энтропии вектора выходов  $Y$ , определяемый требованиями к точности процессов регулирования в заданном диапазоне изменения внешней среды ( $F \in \Gamma_F$ );  $\Gamma_{X_2}$ ,  $\Gamma_{Y_2}$  — соответственно область критических (потенциально опасных) режимов и область возможных значений выходных параметров ГТД при функционировании его в области критических режимов.

**Шаг 5.** Производится синтез алгоритмов УП ИСУ из условия

$$H(A)_{\text{УП}} \rightarrow \min$$

и ограничения  $H(Y/U_{\text{opt}}, F) \leq H_{3\text{доп.}}$ ;  $\forall X \in \Gamma_{X_2}$ ;  $Y \in \Gamma_{Y_3}$ ;  $U \in \Gamma_U$ ;  $F \in \Gamma_F$ ;  $G \in \Gamma_G$ , где  $H_{3\text{доп.}}$  — допустимый уровень энтропии вектора выходов  $Y$  с учетом неопределенности целей управления ( $G \in \Gamma_G$ );  $\Gamma_{X_3}$ ,  $\Gamma_{Y_3}$  —

соответственно область опасных режимов работы ГТД и область возможных значений выходных параметров объекта управления при функционировании его в области опасных режимов работы. Предполагается, что  $H_{1\text{доп.}} < H_{2\text{доп.}} < H_{3\text{доп.}}$ .

**Шаг 6.** Производится оценка суммарной сложности алгоритмов ИСУ ГТД

$$H_{\Sigma}(A) = H(A)_{\text{ИУ}} + H(A)_{\text{УК}} + H(A)_{\text{УП}}$$

и оценка выполнения поставленной цели.

Отметим, что так как задача выбора проектного решения ИСУ ГТД относится к классу обратных задач, то процесс решения этой задачи является циклическим (итеративным).

При этом необходима разработка библиотеки типовых проектных решений с оценкой энтропийной сложности алгоритмов управления на различных уровнях иерархии ИСУ ГТД. Необходимо также использовать универсальные процедуры оптимизации параметров (например, на основе генетических алгоритмов) и имитационного моделирования ИСУ (например, на основе метода планирования эксперимента). Требуется разделение (на каждом уровне) этапов структурного и параметрического синтеза алгоритмов управления ГТД.

#### 4. НЕЙРОСЕТЕВЫЕ МОДЕЛИ И АЛГОРИТМЫ УПРАВЛЕНИЯ ГТД

При поиске проектных решений на различных уровнях ИСУ ГТД сегодня активно используются нелинейные многорежимные динамические модели. В качестве базовых при построении этих моделей могут использоваться алгоритмы интерполяции характеристик ГТД, реализуемые на основе кусочно-линейной интерполяции, нейросетевой интерполяции или интерполяции на основе нечеткой логики.

Исследования по применению нейронных сетей для построения нелинейных динамических моделей ГТД показали возможность их использования при решении задач анализа и синтеза нейросетевых алгоритмов управления с обучением на исполнительном уровне ИСУ ГТД [5–7]. На рис. 2 представлена общая схема построения нейросетевой модели одновального ГТД на основе обучающей выборки, составленной из дискретных отсчетов значений динамической характеристики  $\bar{G}_{\text{Т.пр}} = f(\bar{n}_{\text{пр}}, \dot{n}_{\text{пр}})$ .

Здесь  $\bar{G}_{\text{Т.пр}}$ ,  $\bar{n}_{\text{пр}}$ ,  $\dot{n}_{\text{пр}}$  — соответственно относительные приведенные значения расхода топлива в камеру сгорания, частоты вращения и ускорения вала ротора двигателя;  $\Pi$  — сигнал «помпажа», принимающий значение «истина» (логическая «1»), если режим работы двигателя выходит на границу газодинамической устойчивости (область I), или «ложь» (логический «0»), если помпажный режим отсутствует;  $\Delta$  — оператор временной задержки. Данная нейросетевая модель, в целом, обеспечивает требуемую точность вычислений и имеет достаточно простую структуру, что позволяет использовать ее при решении задач синтеза алгоритмов управления.

Можно предложить новый класс нейросетевых многорежимных динамических моделей ГТД, в качестве ядра которых используется 3-слойный персептрон. Сложность и точность данной модели зависит, прежде всего, от количества нейронов в скрытом слое. Описание данной модели имеет следующий вид:

$$\begin{aligned} \dot{x} &= A(x)(x - x^{\text{сТ}}) + B(x)(u - u^{\text{сТ}}), \\ y &= C(x)(x - x^{\text{сТ}}) + D(x)(u - u^{\text{сТ}}), \\ u^{\text{сТ}} &= Q(x), \\ A(x) &= \sum_{i=1}^N W_i^1 f_i(\omega_i \eta) + \delta^1, \\ B(x) &= \sum_{i=1}^N W_i^2 f_i(\omega_i \eta) + \delta^2, \\ C(x) &= \sum_{i=1}^N W_i^3 f_i(\omega_i \eta) + \delta^3, \\ D(x) &= \sum_{i=1}^N W_i^4 f_i(\omega_i \eta) + \delta^4, \\ S(x) &= \sum_{i=1}^N W_i^5 f_i(\omega_i \eta) + \delta^5, \\ Q(x) &= \sum_{i=1}^N W_i^6 f_i(\omega_i \eta) + \delta^6, \end{aligned} \quad (3)$$

где  $f_i(\cdot)$  — функция активации нейрона;  $W_i^j$  — настраиваемые веса нейронной сети;  $\delta^j$  — смещения в отдельных слоях нейронной сети,  $i = \overline{1, Z}$  ( $Z$  — количество нейронов в скрытом слое персептрона);  $j = \overline{1, 6}$ ;  $x \in R^n$  — вектор переменных состояния ГТД;  $y \in R^s$  — вектор измеряемых параметров двигателя;  $u \in R^m$  — вектор управляющих воздействий;  $x^{\text{сТ}}$ ,  $u^{\text{сТ}}$  — значения векторов  $x$  и  $u$ , лежащих на статической характеристике ГТД;  $\omega_i$  —  $i$ -й элемент вектора синаптических весов  $\Omega$ .

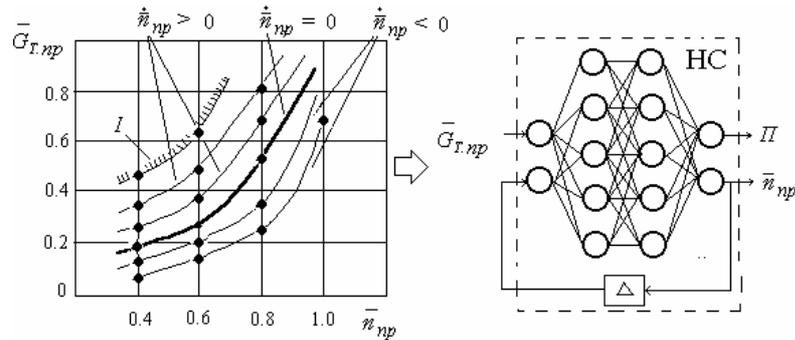


Рис. 2. Построение нейросетевой модели на основе динамической характеристики ГТД

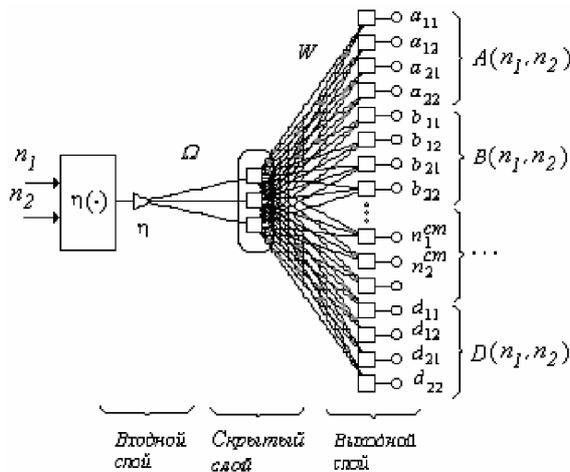


Рис. 3. Нейронная сеть, используемая при построении многорежимной динамической модели

На рис. 3 представлена нейронная сеть, являющаяся ядром рассматриваемого типа моделей (6) для многорежимного ГТД («изд. 21»), где  $\eta = \eta(x)$  – скалярный параметр, характеризующий текущий режим работы ГТД как функция от вектора состояния  $x = (n_1, n_2)$ ;  $n_1$  и  $n_2$  – частоты вращения роторов компрессоров низкого и высокого давления;  $W$  – матрица синаптических связей нейронной сети.

Показано, что использование энтропийного подхода при обучении нейросетевых моделей позволяет выбрать оптимальную структуру нейронной сети на основе компромисса между сложностью и точностью модели [7].

В [6] решается задача синтеза многорежимного нейросетевого регулятора ГТД на основе критерия минимальной сложности при заданных требованиях к точности, устойчивости и качеству процессов управления на заданном множестве режимов работы двигателя.

В качестве базовой структуры нейросетевого регулятора принимается динамическая

(рекуррентная) нейронная сеть в виде перцептрона. На рис. 4 показан фрагмент сети (канал управления), связывающий  $j$ -й вход  $v_j[k]$  с  $i$ -м выходом регулятора  $u_i[k]$ ;  $k$  – дискретное время ( $k = 0, 1, 2, \dots$ ).

Исследуемая схема включает в себя  $p_j$  элементов задержки во входном слое и  $q_i$  элементов задержки в выходном слое нейронной сети. Общее число нейронов здесь равно  $(p_j + q_i + \sigma + 2)$ , где  $\sigma$  – число нейронов в скрытом слое. Настройка сети на получение желаемого соотношения «вход  $v_j \rightarrow$  выход  $u_i$ » осуществляется путем корректировки (обучения) значений весов синаптических связей  $W_{\alpha\beta}$ ,  $W_{\beta}$  нейронной сети.

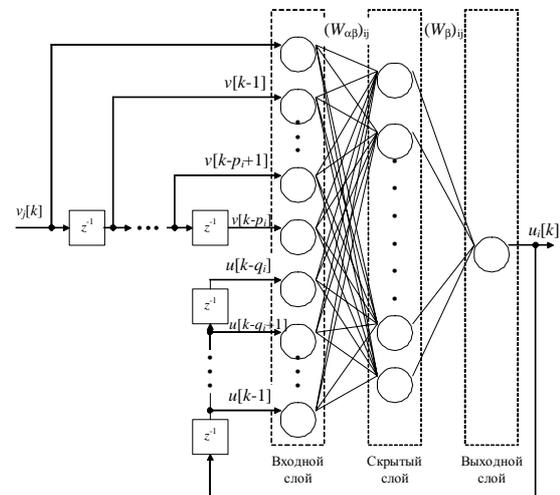


Рис. 4. Базовая структура канала нейросетевого регулятора ГТД

Как показано в [6], при выборе структуры нейросетевого регулятора должно учитываться следующее условие

$$\left( 2N + \sum_{i=1}^N p_i \right) \sigma + (\sigma - R) \sum_{i=1}^N q_i \geq (N + n) R,$$

где  $R$  – число базовых рабочих режимов ГТД,  $N$  – число управляющих воздействий ГТД.

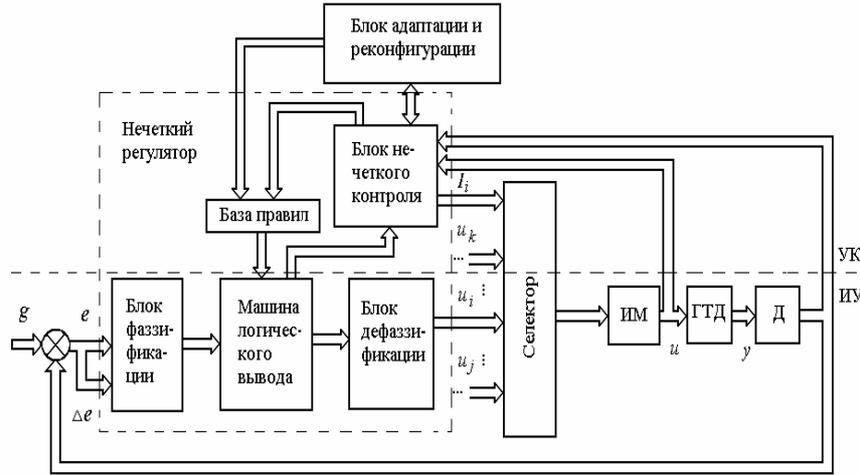


Рис. 5. Нечеткая отказоустойчивая система управления ГТД

Полученное соотношение позволяет определить требуемое число элементов задержки и число нейронов в скрытом слое при выполнении поставленных требований к синтезируемому регулятору (и, в том числе, требования его минимальной сложности).

#### 5. АЛГОРИТМЫ УРОВНЯ КООРДИНАЦИИ ИСУ ГТД

Уровень координации ИСУ (УК) ИСУ ГТД представляет собой подсистему принятия решений в режиме *on-line*, причем в качестве критерия при выборе альтернативы могут использоваться энтропийные оценки принимаемых решений. Основа УК — координатор, выступающий в роли посредника (промежуточного звена) между уровнем планирования ИСУ ГТД, выполняющим директивные (обязательные для исполнения) функции, и исполнительным уровнем, непосредственно контактирующим с ГТД как объектом управления путем формирования управляющих воздействий на его исполнительные органы. Отличительной особенностью уровня координации является наличие базы знаний (БЗ), содержащей информацию о возможном поведении подсистем управления ГТД и изменении характера их взаимодействия (реконфигурации системы) при возникновении тех или иных ситуаций (в том числе нештатных) [4].

В качестве базового критерия при построении алгоритмов уровня УК может быть выбрана энтропийная оценка надежности подсистем управления ГТД, что позволяет обеспечить высокую надежность (отказоустойчивость) системы в реальном масштабе времени. Сложность реализации алгоритмов этого

уровня при этом определяется не только алгоритмической сложностью алгоритмов управления, но и сложностью БД и БЗ этого уровня.

Рассмотрим обобщенную структуру нечеткой отказоустойчивой системы управления САУ ГТД (рис. 5), где  $e$  — вектор ошибки управления;  $\Delta e$  — вектор производной ошибки;  $u$  — вектор управляющих воздействий;  $g$  — вектор задающих воздействий;  $y$  — вектор измеряемых параметров ГТД; Д — блок датчиков измеряемых параметров; ИМ — блок исполнительных механизмов ГТД.

Обеспечение отказоустойчивости САУ здесь достигается за счет анализа значений векторов  $e$ ,  $\Delta e$ ,  $u$ ,  $y$  с помощью блока нечеткого контроля, формирующего энтропийную оценку состояния канала управления, а также блока адаптации и реконфигурации, осуществляющего сбор и анализ информации для обновления базы правил нечеткого регулятора.

Блок нечеткого контроля передает значение оценки энтропии  $I_i$  на вход интеллектуального селектора, который использует ее при выборе канала управления. На ИУ системы управления реализуются: блок фаззификации, в котором выполняется перевод значений элементов векторов  $e$ ,  $\Delta e$  в значения лингвистических переменных; машина логического вывода, осуществляющая вывод на знаниях; блок дефаззификации, в котором выполняется перевод значений лингвистических переменных в значения вектора управляющих воздействий  $u$ ; база правил, содержащая нечеткие правила принятия решений в зависимости от ситуации управления.

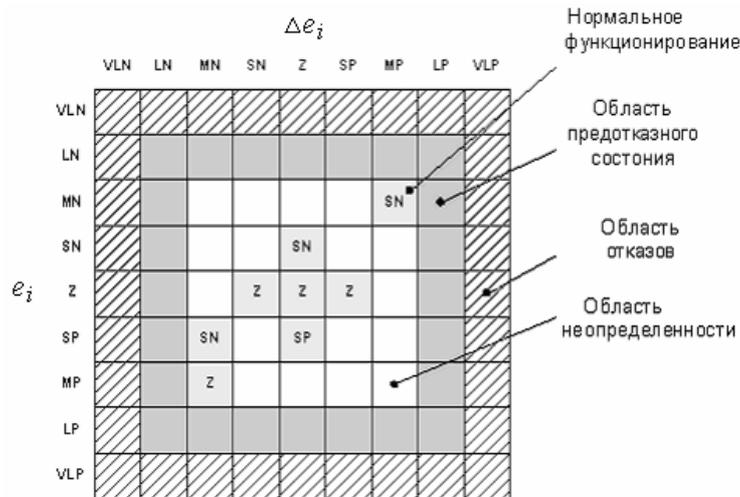


Рис. 6. Расширенная таблица решений (база правил) нечеткого регулятора

На рис. 6 представлен возможный вид расширенной таблицы решений (базы правил) отказоустойчивой САУ, представляющей собой набор нечетких правил «ЕСЛИ-ТО» для  $i$ -го канала управления САУ ГТД, где VLN, LN, MN, SN, Z, SP, MP, LP, VLP – набор значений лингвистических переменных (Z – Zero, SP – Small Positive, SN – Small Negative и т. д.). Для конкретной таблицы решений возможна оценка ее энтропии на режимах нормального функционирования САУ, ее предотказного состояния, состояния отказа и состояния неопределенности (т.е. случая нерасчетных соотношений для сигналов  $e_i$  и  $\Delta e_i$ ).

Для построения моделей отказов системы управления ГТД можно воспользоваться подходом, основанным на построении набора продукционных правил. Данные модели строятся на основе извлечения правил (знаний) из графиков переходных процессов, представляющих собой обучающую выборку, полученную при имитации отказов конкретных датчиков или исполнительных механизмов. В качестве алгоритмов извлечения знаний при этом можно использовать алгоритмы интеллектуального анализа временных рядов.

Рассмотрим пример построения модели отказа, связанного с потерей управляемости исполнительного механизма подачи расхода топлива  $G_T$  в канале частоты вращения ротора компрессора низкого давления  $n_1$ .

На рис. 7 представлен «образ» отказа  $e_{n1} = f(n_1^o, de_{n1}/dt)$ , где  $e_{n1}$  – сигнал изменения ошибки управления в канале частоты вращения  $n_1$ ;  $de_{n1}/dt$  – производная сигнала ошиб-

ки;  $n_1^o$  – сигнал уставки на входе подсистемы управления  $n_1$ .

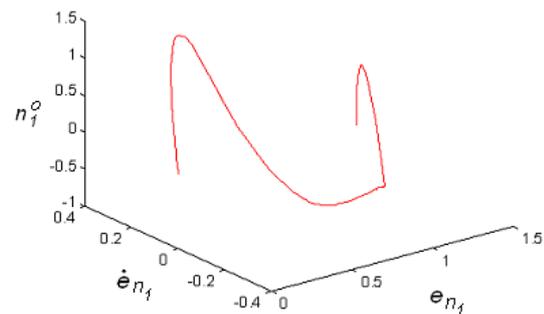


Рис. 7. Образ отказа  $e_{n1} = f(n_1^o, de_{n1}/dt)$

Таблица 1  
Модель отказа в виде продукционных правил

<p>Модель отказа в виде набора продукционных правил (отказ исполнительного механизма подачи топлива <math>H=0, M=0</math>)</p>	
Правило 1:	if $(n_1^o > 0.70522)$ and $(de_{n1}/dt \leq -0.00034)$ then $e_{n1} = 4.765197 - 7.27n_1^o - 0.4 de_{n1}/dt$
Правило 2:	if $(n_1^o > 0.71)$ and $(n_1^o \leq 1.05587)$ then $e_{n1} = -1.10676 + n_1^o$
Правило 3:	if $(n_1^o > 1.05587)$ then $e_{n1} = -1.129564 + 1.02 n_1^o$
Правило 4:	if $(n_1^o \leq 0.70522)$ and $(de_{n1}/dt \leq -0.00034)$ then $e_{n1} = -6.446346 + 9.74 n_1^o + 0.66 de_{n1}/dt$
Правило 5:	if $(n_1^o \leq 0.71)$ and $(de_{n1}/dt > -0.00034)$ then $e_{n1} = -0.002101 + 0.38 n_1^o + 0.13 de_{n1}/dt$

В табл. 1 представлены результаты процедуры извлечения знаний из данных, представленных на рис. 7.

Полученные модели отказов хранятся в БЗ УК и используются при оценке ситуации управления с целью формирования управляющих воздействий на переключение каналов управления ГТД.

## 6. АЛГОРИТМЫ ПЛАНИРОВАНИЯ ИСУ ГТД

Основной особенностью алгоритмов на уровне планирования ИСУ является активное использование знаний, т. е. активное взаимодействие с распределенной БЗ и машиной логического вывода.

Концептуальная модель алгоритмов принятия решений для достижения целей этого уровня может быть представлена в виде множества виртуальных вычислительных машин (рис. 8). Машина  $B_i$ , обеспечивающая решение задач, соответствующих  $i$ -й цели, соединена по каналу обмена информацией (КОИ) с машиной  $B_j$ , обеспечивающей решение задач для достижения  $j$ -й цели. При этом осуществляется взаимодействие с распределенной базой данных (РБЗ), являющейся хранилищем информации, накопленной на протяжении всего жизненного цикла изделий этой серии.

При данной организации вычислительного процесса обеспечивается параллельная (асинхронная) обработка информационных потоков. При этом используются алгоритмы накопления знаний, осуществляющие сбор информации, извлечение знаний, сжатие информации. На основе анализа информации, представленной в БЗ, корректируется модель внешней среды и объекта управления, что позволяет обеспечить оптимальное использование ресурсов ИСУ ГТД. Таким образом, на уровне планирования присутствуют признаки самоорганизующейся системы, которая в зависимости от состояния окружающей среды изменяет свою структуру для достижения своей цели.

Для организации уровня планирования ИСУ ГТД можно использовать многоагентную архитектуру, позволяющую обеспечить решение комплекса поставленных задач в рамках парадигмы открытых систем. Особенностью многоагентных систем является возможность динамического изменения состава программных агентов и решение оптимизационных задач на основе алгоритмов теории принятия решений. На рис. 9 представ-

лена возможная архитектура многоагентной системы уровня планирования ИСУ ГТД, где  $ПА_i$  —  $i$ -й программный агент;  $БЗ_i$  — база знаний  $i$ -го агента;  $МЛВ$  — машина логического вывода;  $ЯИ$  — языковой интерфейс (система поддержки протоколов обмена знаниями с другими агентами);  $Контейнер$  — программная оболочка агента, реализованная на языке высокого уровня;  $ВС$  — вычислительная среда;  $КОИ$  — канал обмена информацией между подсистемами уровня планирования и другими программными агентами. БЗ программного агента содержит продукционные правила на основе нечеткой логики, функциональные зависимости в виде аналитических зависимостей или нейронных сетей. Многоагентная реализация УП позволяет обеспечить высокую надежность программной реализации в соответствии с требованиями стандарта реализации программного обеспечения бортовых систем ARINC653.

Решение задачи обеспечения защиты информации в бортовой распределенной вычислительной системе также может осуществляться на основе многоагентной организации системы. Применение энтропийного подхода позволяет при этом оптимизировать структуру многоагентной системы обеспечения заданного уровня защищенности информации.

Для повышения надежности программного обеспечения бортовой вычислительной системы можно воспользоваться методом структурной верификации программной реализации алгоритмов управления с применением динамических сетей (сетей Петри), обеспечивающих обнаружение структурных дефектов.

Использование предложенного алгоритма структурной верификации программы с помощью сети Петри позволяет оценить точное число возможных состояний вычислительного процесса. Если в качестве такого состояния выбирается позиция в сети Петри, то энтропия программы в этом случае равна  $H = \ln(\text{card}(P))$ , где  $\text{card}$  — мощность множества возможных состояний, моделируемых позициями сети Петри.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Рассмотрена концепция построения интеллектуальных систем управления сложными техническими объектами (примером которых является ГТД), основанная на вертикальной и горизонтальной декомпозиции процессов управления в рамках архитектуры откры-

тых информационных систем. В отличие от известных подходов, данный подход позволяет обеспечить достижение цели управления на основе принципа минимальной сложности (минимальной энтропии) путем перераспределения ресурсов системы в условиях их дефицита, а также адаптации характеристик системы при изменении ситуации управления на основе самообучения и самоорганизации ИСУ.

2. Разработан теоретико-информационный подход к оптимизации проектных решений, осуществляемых на уровнях планирования, координации и исполнительном уровне ИСУ ГТД, основанный на энтропийной оценке сложности алгоритмов управления, что позволяет формализовать процедуру структурной оптимизации ИСУ ГТД.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Aridis, G. N.** Hierarchically Intelligent machines / G. N. Aridis. Singapore : World Scientific Pub., 2001. 126 p.
2. **Эшби, У. Р.** Введение в кибернетику / У. Р. Эшби; пер. с англ. М. : Изд-во иностр. лит., 1959.
3. **Васильев, В. И.** Синтез многосвязных автоматических систем методом порядкового отображения / В. И. Васильев, Ф. А. Шаймарданов. М. : Наука, 1983. 126 с.
4. **Kusimov, S. T.** Design of intelligent control system based on theoretic-information approach / S. T. Kusimov, B. G. Ilyasov, V. I. Vasilyev, S. S. Valeyev // Proc. of the 7th ASIA-Pacific Conf. on Control and Measurement, 10–18 August, Tibet, China, 2006. P. 28–33.
5. **Валеев, С. С.** Отказоустойчивые системы управления сложными динамическими объектами с использованием искусственных нейронных сетей / С. С. Валеев, В. И. Васильев, Б. Г. Ильясов, Сун Жан-Гуо // Нейрокомпьютеры: разработка, применение, 2000. № 1. С. 32–35.
6. **Vasilyev, V. I.** Design of neurocontroller for gas-turbine engine multi-mode control / V. I. Vasilyev, S. S. Valeyev, A. A. Shilonosov // Proc. of the 8th Int. Conf. on Neural Information Processing (ICONIP-2001). Shanghai, November 14–18, 2001. Vol. 2. P. 746–750.
7. **Vasilyev, V. I.** Identification of complex technical objects on the basis of neural network models and entropy approach / V. I. Vasilyev, S. S. Valeyev, Sun Jianguo // Proc. of the 9th World Multi-Conf. on Systemics, Cybernetics, and Informatics. Orlando, Florida, USA, 10–13 July 2005. Vol. 9. P. 89–93.

#### ОБ АВТОРАХ

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



**Валеев Сагит Сабитович**, проф. той же каф. Дипл. инж.-электромех. (УГАТУ, 1980). Д-р техн. наук по системн. анализу и управл. (УГАТУ, 2004). Иссл. в обл. интеллектуальных систем управления.

