

УДК 621.452

## ЭКСПЕРТНАЯ СИСТЕМА ОЦЕНКИ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ АВИАЦИОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ДИНАМИЧЕСКИХ НАБОРОВ ИНФОРМАТИВНЫХ ПРИЗНАКОВ

С. В. ЖЕРНАКОВ<sup>1</sup>, Н. С. ИВАНОВА<sup>2</sup>

<sup>1</sup> zhsviit@mail.ru, <sup>2</sup> ivanova@ugatu.su

ФГБОУ ВО «Уфимский государственный авиационный технический университет» (УГАТУ)

Поступила в редакцию 05.13.2016

**Аннотация.** Обсуждается проблема поддержки принятия решений в задаче оценки технического состояния авиационных двигателей в условиях, когда представления о сложившейся проблемной ситуации оказываются размытыми, нечеткими и противоречивыми. Предлагается когнитивная модель, позволяющая осуществить структуризацию знаний экспертов, выраженных в нечетких категориях, и разработать на этой основе правила согласования мнений группы экспертов с целью подготовки обоснованных оценок технического состояния исследуемых объектов. Модель базируется на коллективной каузальной когнитивной карте, описывающей влияние, причинность и системную динамику факторов-симптомов и факторов-причин исследуемой проблемной ситуации. Приводится общая схема оценки технического состояния авиационных двигателей, в рамках которой реализуется совокупность взаимосвязанных процессов получения и преобразования информации, которые протекают в ходе специальным образом организованного взаимодействия объекта исследования, программно-аппаратных средств контроля и диагностики, а также искусственной интеллектуальной среды, позволяющей упорядочить действия экспертов, направленные на обоснованный выбор целесообразного варианта исследования.

**Ключевые слова:** авиационный двигатель; техническое состояние; экспертная система; слабоструктурированная ситуация, когнитивная карта; формализация; концептуальная структуризация экспертных знаний; динамические характеристики; ортогональный базис; диагностические признаки.

### ВВЕДЕНИЕ

Существующие тенденции в области авиационного двигателестроения свидетельствуют о переходе к методологии безопасной эксплуатации авиационных двигателей по техническому состоянию. О намерении руководства МО РФ практически приступить к масштабной реализации этой методологии свидетельствует, в частности, принятие «Концепции адаптации системы обслуживания и ремонта вооружений и военной техники к новому облику Вооруженных сил Российской Федерации». Суть методологии безопасной эксплуатации по техническому состоянию заключается в максимальном использовании запасов работоспособности конструкции и комплектующих изделий каждого экземпляра двигателя на основе проведения в процессе эксплуатации необходимого контроля его технического состояния и систематической оценки и анализа надежности парка двигателей данного типа в целом. При этом достигается снижение эксплуатационных затрат за счет:

– замены трудоемких и дорогостоящих плановых заводских ремонтов изделий и двигателя в целом видами периодических регламентных работ – контрольно-восстановительными работами;

– сокращения потребных объемов обменных фондов запасных частей в связи с отменой назначенных ресурсов и сроков службы и соответствующих замен и ремонтов изделий;

– уменьшения трудоемкости технического обслуживания и ремонтов вследствие формирования их рациональных режимов при внедрении методов эксплуатации по состоянию.

При использовании методологии безопасной эксплуатации авиационных двигателей по техническому состоянию одной из основных проблем является разработка и внедрение эффективной диагностики, позволяющей своевременно обнаруживать дефекты, возникающие на основных деталях при исчерпании их ресурсов [1]. Учитывая важность надежной работы двигателя для

обеспечения безопасности полета воздушного судна, существующие нормы летной годности требуют проведения большого объема различных проверок в ходе как стендовых, так и летных испытаний. При этом в двигателях имеются детали и узлы, по отношению к которым диагностика в полной мере неприменима. В частности, это касается лопаток и дисков компрессоров и турбин, а также топливных коллекторов, разрушение которых приводят к тяжелым последствиям, в том числе к разрушению двигателя и самолета. Чтобы избежать подобных последствий, при оценке ресурса двигателя прибегают к прочностным расчетам, которые дают возможность выявить наиболее повреждаемые детали и наиболее повреждающие режимы эксплуатации. Однако для того чтобы такие расчеты были объективными и эффективными, необходимо наличие полного объема характеристик циклического деформирования материалов, характеристик циклической ползучести, циклической пластичности, характеристик циклической прочности с учетом совместного действия вибрационных напряжений, а также наличие полного объема характеристик, определяющих развитие трещин до предельного состояния. В настоящее время такие характеристики в полном объеме отсутствуют, что значительно снижает эффективность расчетных методов. В ряде случаев в качестве таких характеристик используются результаты лабораторных ресурсных или ускоренных эквивалентно-циклических испытаний лопаток турбины, а также дисков компрессоров и турбин при их циклическом нагружении температурной нагрузкой с одновременным наложением вибрационной нагрузки. Но и при лабораторных испытаниях не всегда удается добиться соответствия нагрузок на установках нагрузкам на двигателе, поскольку эта нагрузка существенно зависит от выполняемого в эксплуатации профиля полета. Все это приводит к тому, что при испытаниях не удается воспроизвести в полном объеме такие дефекты, как растрескивание изнутри на входных кромках лопаток турбины высокого давления, трещины на галтелях титановых дисков турбокомпрессора низкого давления, трещины на сварных корпусах камеры сгорания, трещины на коллекторах форсажной камеры и т. д.

В результате в настоящее время в России введена эксплуатация по техническому состоянию только для двигателей РД-33 и АЛ-31, которые используются в ВВС, а для двигателей гражданской авиации эксплуатация по-прежнему ведется по фиксированному ресурсу. Эффективным средством повышения достоверности оценки

технического состояния авиационных двигателей может служить экспертная информация, которая формируется в результате интуитивно-логического анализа исходных данных с привлечением соответствующего математического аппарата группой экспертов, что позволяет выявить объективную природу параметров технического состояния исследуемого объекта и расширить на этой основе возможности в достоверной оценке технического состояния последнего.

### СТРУКТУРА ЭКСПЕРТНОЙ СИСТЕМЫ НА ОСНОВЕ СЕМИОТИЧЕСКОЙ ПОРОЖДАЮЩЕЙ МОДЕЛИ

Центральное место в любой экспертной системе занимает база знаний. Применительно к рассматриваемому случаю экспертной системы оценки технического состояния авиационных двигателей база знаний формирует исходные данные для проведения исследовательских процедур в виде последовательности проверок и правил обработки их результатов с целью диагностики состояния объекта исследования. В отличие от традиционной формальной модели базы знаний, которая задается четверкой множеств:

$$FM = \langle T, P, A, R \rangle, \quad (1)$$

где  $T = X \times Y \times \Gamma$  – множество базовых элементов, в состав которого входит совокупность  $X = \{X_1, X_2, \dots, X_n\}$  детализированных до определенного уровня возможных состояний объекта исследования, доступные исследовательские процедуры  $Y = \{Y_1, Y_2, \dots, Y_m\}$ , позволяющие снизить неопределенность в оценке состояний объекта и возможные результаты  $\Gamma = \{\gamma_1, \gamma_2, \dots, \gamma_m\}$  проведенных экспериментов;  $P$  – замкнутое множество синтаксических правил, включающее элементарные (атомарные) формулы вида:  $X_0 \in X, Y_0 \in Y, \Gamma_0 \in \Gamma$ , паросочетания вида:  $P_0 : (Y_0, \Gamma_0) \rightarrow X_0$ , кванторы  $\exists, \forall$ , предикатные знаки и скобки, нечеткие логические формулы  $\&, \vee, \rightarrow$  («если, то») и т. д., с помощью которых из элементов  $T$  строятся синтаксически правильные выражения;  $A$  – множество синтаксически правильных выражений, элементы которого называются аксиомами;  $R$  – замкнутое множество семантических правил (правил вывода), включающее нечеткие правила вывода – трансляционные, модификации и композиции, а также совокупность нечетких многоместных предикатов, с помощью которых из

множества аксиом строятся семантически правильные выражения (выводимые выражения), в данной работе предлагается использовать семиотическую порождающую модель следующего вида [2]

$$FM = \langle T, P, A, R, Q(T), Q(P), Q(A), Q(R) \rangle, (2)$$

здесь первые четыре компонента те же, что и в записи формальной модели (1), а остальные компоненты – процедуры изменения первых четырех компонент под влиянием накапливаемого в базе знаний экспертной системы опыта о функционировании и техническом состоянии исследуемого авиационного двигателя.

При использовании семиотической порождающей модели (2) база знаний будет содержать не только фиксированный набор аксиом и правил, но и совокупность специальных процедур, которые активизируются по мере надобности для модификации правил оценки технического состояния. Процедуры определяют последовательность действий, которые нужно выполнять в складывающихся ситуациях. При этом не требуется описывать все возможные состояния объекта исследования для его диагностики. Достаточно использовать исходные данные и процедуры, генерирующие необходимые описания ситуаций и требуемые действия. Главное преимущество семиотической модели представления знаний заключается в более эффективном механизме вывода за счет введения дополнительных знаний о применении процедур, т. е. знаний о том, каким образом использовать накопленные знания для решения конкретной задачи. Подобная структурная организация базы знаний оказывается особенно эффективной в условиях неполноты знаний, когда отсутствует возможность строгого доказательств справедливости отдельных фактов, поскольку последние гипотетически признаются верными при условии, что правила вывода базы знаний не позволяют доказать противное.

Интеллектуальный анализ проблемных ситуаций, возникающих при оценке технического состояния, базируется на системе внутренних представлений и знаний специалистов, осуществляющих подобный анализ. Все это обуславливает возможные ошибки в определении причин и следствий применительно к исследуемой ситуации, поскольку внутренние представления включают в себя набор убеждений, особенностей восприятия, ценностных и практических установок соответствующего специалиста, которыми он руководствуется в своей деятельности и влияет на процесс разрешения проблем-

ной ситуации. При этом отсутствие единой понятийной системы для участников процесса оценки ситуации приводит к тому, что их представления о причинах и возможных способах изменения ситуации оказываются размытыми, нечеткими и противоречивыми. Таким образом, формализация нечетких представлений становится одной из главных задач, которую надо решать при разработке моделей и методов принятия решений в слабоструктурированных ситуациях. Одно из новых направлений современной теории поддержки и принятия решений заключается в когнитивном моделировании при исследовании слабоструктурированных систем и ситуаций [3–5]. Когнитивный подход к моделированию и управлению слабоструктурированными системами направлен на разработку формальных моделей и методов, поддерживающих интеллектуальный процесс решения проблем благодаря учету в этих моделях и методах когнитивных возможностей (восприятие, представление, познание, понимание, объяснение) субъектов управления при решении управленческих задач. Анализ когнитивной модели позволяет выявить структуру процедуры оценивания ситуации отдельными экспертами, найти наиболее значимые факторы, влияющие на ее эффективность, сравнить воздействие факторов на достижимость целей оценивания, а также разработать сценарии, стратегии управления экспертной процедурой и сформировать соответствующие управленческие решения.

В данной работе предлагается совокупность когнитивных моделей, позволяющая осуществить структуризацию знаний экспертов, выраженных в нечетких категориях, и разработать на этой основе правила согласования мнений группы экспертов с целью подготовки обоснованных оценок технического состояния исследуемых объектов.

Предлагаемая когнитивная модель базируется на коллективной каузальной когнитивной карте, описывающей влияние, причинность и системную динамику факторов-симптомов и факторов-причин проблемной ситуации, а также активных субъектов, влияющих на развитие ситуации. Такая когнитивная модель позволяет проводить динамический анализ проблемной ситуации, который лежит в основе генерации возможных сценариев экспертной оценки технического состояния. С учетом сделанных замечаний аналитическое описание когнитивной модели экспертной системы будет иметь следующий вид:

$$M_{\omega c} = \langle K_k(\mathbf{X}, G, f); AS(Y, \Gamma); C(\Omega_Y, \Omega_{\mathcal{R}_Y}, X^{int}, X^{ext}) \rangle, \quad (3)$$

здесь  $K_k(\mathbf{X}, G, f)$  – когнитивная карта, заданная в виде взвешенного ориентированного графа, в котором множество вершин  $\mathbf{X} = X_c \cup X_{np}$  представляет собой совокупность факторов-симптомов и факторов-причин, определяющих возможные состояния объекта исследования, при этом указанные факторы делятся на внутренние  $X^{int} = X_c^{int} \cup X_{np}^{int}$ , включающие совокупность характеристик, позволяющих описать текущее состояние проблемной ситуации, и внешние  $X^{ext} = X_c^{ext} \cup X_{np}^{ext}$ , включающие совокупность внешних по отношению к проблемной ситуации условий, непосредственно влияющих на ее состояние; множество дуг  $G$  отражает причинно-следственные связи между факторами и их влияние друг на друга, при этом веса на дугах могут принимать как численные значения, знак которых определяет желаемое направление влияния, а абсолютная величина веса – силу влияния, так и значения нечетких предикатов  $G_p$ , поскольку они в наибольшей степени соответствуют качественному анализу, на который ориентированы когнитивные модели; функция  $f$  определяет правила изменения весов дуг под влиянием накапливаемого в базе знаний экспертной системы опыта о структуре концептуальной схемы, в рамках которой проводится первичная понятийная структуризация знаний экспертов.

Далее, в состав модели (3) входит множество  $AS(Y, \Gamma)$  активных субъектов, имеющих возможность так или иначе влиять на факторы, при этом каждый активный субъект задан на множестве указанных выше доступных исследовательских процедур и множестве возможных результатов проведенных экспериментов. Еще одним основополагающим элементом когнитивной модели является целевой образ  $C(\Omega_Y, \Omega_{\mathcal{R}_Y}, X^{int}, X^{ext})$  проблемной ситуации, который определяет желательные направления изменения ситуации с позиции лица принимающего решение. Целевой образ объединяет формализованные характеристики, определяющие цель проводимого исследования и зависящие от располагаемой информации  $\Omega_Y$  о возможных способах проведения исследований и информации  $\Omega_{\mathcal{R}_Y}$  о существующих предпочтениях  $\mathcal{R}_Y$

при выборе той или иной стратегии исследования, а также от множеств внутренних и внешних факторов.

Построенная модель служит основой для концептуальной структуризации знаний разнородного коллектива экспертов и формирования единой понятийной системы для всех участников процесса оценки технического состояния исследуемого объекта.

### ОБЩАЯ СХЕМА ОЦЕНКИ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ АВИАЦИОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ НА ОСНОВЕ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОГО АНАЛИЗА ДАННЫХ

Разработка общей схемы оценки технического состояния объектов названного класса, в рамках которой реализуется совокупность взаимосвязанных процессов получения и преобразования информации, которые протекают в ходе специальным образом организованного взаимодействия объекта исследования, программно-аппаратных средств контроля и диагностики, а также искусственной интеллектуальной среды, позволяющей упорядочить действия экспертов, направленные на обоснованный выбор целесообразного варианта исследования, предусматривает решение следующих задач [6]:

- выбор принципа организации исследования в целом, порядка чередования режимов проверочных и диагностических процедур – непрерывных автоматических без остановки внутри рабочего цикла, автоматических с остановкой по заданным признакам, полуавтоматических с коррекцией процедуры по результатам текущего контроля, режимов выборочного контроля параметров и реакций отдельных подсистем с учетом их логической взаимосвязи и уровней приоритетов;
- формирование исчерпывающей совокупности типовых исследовательских процедур, методик и алгоритмов проверки, идентификации и оценки состояний с учетом физической природы процессов, протекающих в исследуемом объекте, возможности подачи стимулирующих сигналов для имитации рабочих процессов, а также с учетом возможностей для автоматического восприятия и преобразования ответных реакций в реальном масштабе времени;
- разработка стратегии принятия решения о формировании оптимальной последовательности исследовательских процедур, направленных на достоверную оценку состояния объекта диагностирования или на выявление возможных дефектов в последнем;

• распределение и выдача информации о результатах исследования в форме, пригодной как для принятия оперативных решений по управлению техническим состоянием объекта, так и для долговременных исследований, связанных с прогнозированием изменения технического состояния объекта в процессе накопления неблагоприятных внешних и внутренних воздействий.

Вся перечисленная совокупность функций может быть реализована в рамках подсистемы формирования исследовательских процедур. Эта подсистема формирует всю совокупность предписаний в виде последовательности проверок и правил обработки их результатов с целью оценки технического состояния объекта исследования.

Чтобы конкретизировать модели операций получения и анализа результатов введем в рассмотрение множество переменных состояния объекта  $Z(X)$ , поскольку любой алгоритм исследования в конечном счете направлен на то, чтобы контролировать процесс изменения состояний изучаемого объекта, а также  $F(\Gamma)$  – вектор признаков результата  $\Gamma$ , множество контролируемых параметров  $K = \{K_1, K_2, \dots, K_r\}$ , объединяющих совокупность технических характеристик, однозначно описывающих текущее состояние объекта, и множество  $\Theta = \{\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_s\}$  тактических параметров – совокупность внешних по отношению к объекту условий, непосредственно влияющих на его состояние. Тогда процесс изменения состояний объекта во времени можно описать следующим отображением

$$\mathfrak{Z}: Z(X) \times Y \times T \times K \times \Theta \rightarrow Z(X). \quad (4)$$

Этому отображению ставится в соответствие процедура определения результатов проведенных экспериментов

$$\mathfrak{N}: Z(X) \times Y \times T \times K \times \Theta \rightarrow F(\Gamma). \quad (5)$$

Полученные с помощью последнего отображения результаты зависят от неопределенных факторов, поэтому необходима процедура «осреднения», позволяющая получить числовые значения критерия для всего диапазона изменения неопределенных параметров. Модель такой процедуры может быть представлена следующим образом

$$\Delta F(\Gamma) \rightarrow \varepsilon. \quad (6)$$

Объединение (5) и (6) дает модель операции получения результатов исследования, которая приобретает следующий вид

$$\mathbf{G} = \Delta \otimes \mathfrak{N}: \{Y | : Z(X) \times Y \times T \times K \times \Theta \rightarrow F(\Gamma)\} \rightarrow \varepsilon. \quad (7)$$

Информация, получаемая в процессе исследования, может содержать результат оценки состояния всего объекта (исправен, работоспособен, правильно функционирует), либо результат анализа состояния определенной группы параметров. Кроме того, часто требуется определить действительные значения контролируемых параметров или установить место дефекта.

Каждый из объектов исследования взаимодействует со своими средствами тестового контроля и функционального диагностирования, которые входят в состав интеллектуального распорядительного центра (ИРС). ИРС формирует программы оперативной диагностики, которые предусматривают задание режимов исследования объекта, а также осуществляет процесс обработки всего комплекса результатов оперативной диагностики, оформленных в виде протоколов измерений и процедур записи, хранения, извлечения и использования информации для соответствующих баз данных. Кроме того, ИРС контролирует процесс настройки экспертной системы на конкретный объект контроля посредством занесения в базу знаний информации об объекте. При этом осуществляемые исследовательские процедуры инициируются экспертной системой и выполняются под ее управлением. В свою очередь, ИРС может обращаться к экспертной системе для повышения ситуационной уверенности относительно текущего состояния объекта исследования. В то же время информация о результатах исследования используется для принятия решений об оценке состояния объекта исследования, о локализации возможных дефектов и предотвращении их неблагоприятных последствий, например, за счет управления избыточными ресурсами. Подобная сложная схема взаимодействия ИРС с другими структурными составляющими экспертной системы вытекает из необходимости решения задачи распределения и выдачи информации о результатах исследования в форме, пригодной для принятия решений по управлению техническим состоянием объекта

$$\langle \langle \{A_0, Y, \varepsilon, K, \Theta\} \Rightarrow \{Y^*, \Gamma^*\} \rangle \Rightarrow X^* \rangle, \quad (8)$$

которая формулируется следующим образом: исходя из цели  $A_0$  проводимого исследования, необходимо выбрать в условиях риска и неопределенности оптимальную стратегию  $Y^*$  на множестве эффективных стратегий  $Y$ , используя критерий  $\varepsilon$ , и, получив результат  $\Gamma^*$  оптимального эксперимента, найти наиболее обоснованную оценку  $X^*$  состояния исследуемого объекта.

Важное место в группе исследовательских процедур, позволяющих оценить состояние

сложных динамических объектов, занимают методы на основе идентификации по динамическим характеристикам, что позволяет использовать новые принципы оценки закономерностей признакового пространства с последующим применением известных подходов к распознаванию образов.

### ОСОБЕННОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ДИНАМИЧЕСКИХ НАБОРОВ ИНФОРМАТИВНЫХ ПРИЗНАКОВ ПРИ ОЦЕНКЕ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ АВИАЦИОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

Под динамическим состоянием авиационного двигателя будем понимать, согласно [7], совокупность элементов (подмножество) значений временных рядов, наделенную характерными свойствами. Реальные временные ряды, являясь дискретной моделью поведения динамических систем, как правило, содержат параметрическую неопределенность, являются нестационарными и зашумленными. Обработка таких временных рядов требует разработки и использования различных методик и технологий, которые бы были свободны от предположений классических методов, а именно, стационарность процесса, эргодичность и т.д. С этой целью в работе предлагается использовать специальный ортогональный базис, обеспечивающий равномерную сходимость рядов в пространстве кусочно-гладких функций [8]

$$\varphi_l(t) = \sum_{k=1}^l \lambda_{lk} \psi_k(t), \quad l=1,2,\dots,r-1, \quad (9)$$

где  $\psi_k(t) = \exp(-(k-1)\beta t)$ ,  $\beta > 0$ ,  $k=1,2,\dots$ .

Процедура оценки закономерностей признакового пространства основана на следующем представлении временной характеристики исследуемого объекта

$$y(t) = \sum_{l=1}^q a_l \varphi_l(t). \quad (10)$$

В работе [8] показано, что коэффициенты ортогонального ряда (10) определяются следующим образом

$$a_l[y] = \sum_{k=1}^l \lambda_{lk} Y(\alpha + (k-1)\beta), \quad (l = \overline{1,q}), \quad (11)$$

где  $Y(s)$  – изображение временной характеристики исследуемого объекта.

Соотношение (11) позволяет установить взаимосвязь временных характеристик с признаками неисправностей объекта в пространстве его параметров. Для улучшения сглаживающих свойств в случае использования сильно зашумленных экспериментальных данных в работе

предлагается перейти от дискретных значений временных характеристик к площадям, ограниченным этими кривыми. При этом процедура идентификации будет обладать преимуществами метода площадей, который характеризуется высокой точностью и устойчивостью по отношению к погрешностям вычислений.

Площади под кривыми  $y(t)$  на некотором интервале наблюдения  $[t_0; t_n]$  могут быть приближенно вычислены по методу трапеций

$$S(t_0; t_n) = \left[ \frac{y(t_0) + y(t_n)}{2} + \sum_{k=1}^{n-1} y(t_k) \right] \Delta t, \quad (12)$$

где  $t_k = t_0 + k\Delta t$ ,  $\Delta t$  – фиксированный промежуток времени, например шаг интегрирования.

С другой стороны, эти площади могут быть получены при интегрировании временных характеристик, представленных своими ортогональными рядами

$$S^*(t_0; t_n) = \int_{t_0}^{t_n} y(t) dt = \sum_{l=1}^q a_l \int_{t_0}^{t_n} \psi_l(t) dt \quad (13)$$

или в матричной форме записи

$$S^*(t_0; t_n) = A \cdot \Lambda \cdot \Pi \cdot (\Psi^*(t_0) - \Psi^*(t_n)), \quad (14)$$

здесь  $A = [a_i]_{1 \times q}$  – вектор-строка коэффициентов ортогонального ряда,  $\Lambda = [\lambda_{ij}]_{q \times q}$ ,

$$\Pi = \text{diag} \left( 1; \frac{1}{\beta}; \dots; \frac{1}{\beta(q-1)} \right),$$

$$\Psi^*(t_k) = [t_k, \psi_2(t_k), \dots, \psi_q(t_k)]^T.$$

В результате получаем

$$A = S_T (\Lambda \Pi \Psi_T)^{-1}, \quad (15)$$

где  $\Psi_T = [(\Psi^*(t_0) - \Psi^*(t_1)), \dots, (\Psi^*(t_0) - \Psi^*(t_q))]$   $_{1 \times q}$ ,

$$S_T = [S(t_0; t_1), \dots, S(t_0; t_q)]_{1 \times q}.$$

Оценка технического состояния системы управления по найденной совокупности ее параметров должна ответить на главный вопрос: насколько ее основные характеристики удовлетворяют поставленным требованиям, обеспечивая тем самым выполнение заданных функций. Для этого выдвигается  $N$  альтернативных гипотез  $\Omega = \{\Omega_1, \Omega_2, \dots, \Omega_N\}$ , составляющих полную группу событий и интерпретируемых как классы состояний исследуемого динамического объекта. Другими словами, фрагмент реализации пространства параметров (15) может принадлежать только к одному из заданных классов  $\Omega_i$ . Задача состоит в отнесении наблюдаемых в момент  $t$  или на некотором фиксированном интервале  $[t_0; t_n]$  в соответствии с дискретным планом  $t_k = t_0 + k\Delta t$ , реализаций  $A$  к классу  $\Omega_i$ .

Известно [7], что недостаточная информативность признаков не может гарантировать высокого качества классификации объектов из генеральной совокупности даже при коллективном оценивании технического состояния. Поэтому акцент в подходе к распознаванию состояний динамических объектов смещен в сторону выбора информативных признаков и согласованности оценок их разделяющей способности, приводящих к качественному распознаванию состояний динамических объектов в реальном времени. В качестве диагностических признаков для  $i$ -го состояния  $\Omega_i$  может использоваться набор эталонов состояния динамического объекта, построение которых целесообразно осуществлять по одной из следующих схем:

1) выбор по обучающей выборке диагностических фрагментов соответствующего временного ряда и интервалов между ними с последующим усреднением по выборке;

2) построение мета-эталонных, суть которого в замене исходного множества близкорасположенных в признаковом пространстве объектов одним мета-эталонным.

Решение принимается в пользу того класса, где значение функции конкурентного сходства (FRiS-функции) максимально. Экспериментально показано [7], что применение FRiS-функции существенно повышает качество распознавания для случая пересекающихся состояний, а метод формирования мета-эталонных дает лучшее качество распознавания в условиях высокого уровня зашумленности временных рядов.

По существу эти требования должны рассматриваться как ограничения на возможные отклонения вектора параметров  $A$  по отношению к эталонному (расчетному) набору значений  $A^*$ . Это условие можно интерпретировать следующим образом. Система удовлетворяет поставленным требованиям, если текущая точка  $A$  с координатами  $(a_1, a_2, \dots, a_q)$  в  $q$ -мерном пространстве контролируемых параметров принадлежит области допустимых значений  $\Omega_A$ :  $A \in \Omega_A$ .

Наиболее просто границы допустимой области  $\Omega_A$  определяются в тех случаях, когда контролируемые параметры должны удовлетворять ограничениям вида

$$\underline{a}_i \leq a_i \leq \bar{a}_i, \quad i = \overline{1, q}. \quad (16)$$

При этом область  $\Omega_A$  представляет собой гиперпараллелепипед с гранями, параллельными осям координат.

Часто в этих целях используется так называемый «обобщенный» параметр  $J$ , который вводится как функция контролируемых параметров

$(a_1, a_2, \dots, a_q)$ . Основное требование к выбору обобщенного параметра заключается в простоте вычисления, а его величина должна достаточно адекватно оценивать состояние системы.

В качестве такого обобщенного параметра может использоваться следующее выражение

$$J = \sum_{i=1}^q c_i \|a_i - a_i^*\|, \quad (17)$$

здесь  $a_i^*$  – расчетные значения контролируемых параметров,  $c_i$  – весовые коэффициенты, учитывающие вклад каждого из параметров  $a_i$  в формирование обобщенного показателя  $J$ .

Если допустимая область определяется соотношением  $J \leq J^*$ , где  $J^*$  – граничное значение обобщенного параметра  $J$ , то она принимает ту или иную форму в  $q$ -мерном пространстве в зависимости от используемой в (16) нормы. В случае евклидовой нормы допустимая область принимает форму гиперэллипсоида.

Таким образом, контроль объекта по совокупности параметров (16) можно заменить проверкой выполнения лишь одного условия (17). Более того, наблюдая за изменением обобщенного параметра во времени  $J(t)$ , можно по его величине прогнозировать состояние контролируемой системы объекта в будущий момент времени, что также является одним из достоинств данного подхода.

## ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Предложенный принцип разработки экспертной системы оценки состояния авиационных двигателей с использованием каузальных когнитивных карт позволяет осуществить структуризацию знаний экспертов, выраженных в нечетких категориях, и разработать на этой основе правила согласования мнений группы экспертов с целью подготовки обоснованных оценок технического состояния исследуемых объектов. При когнитивном представлении знаний в базе знаний содержится не фиксированный набор аксиом и правил, а совокупность специальных процедур, которые активизируются по мере необходимости, что обеспечивает более эффективный механизм вывода за счет введения дополнительных знаний о применении процедур, т.е. знаний о том, каким образом использовать накопленные знания для решения конкретной задачи.

Разработан метод оценки технического состояния авиационных двигателей на основе исследования закономерностей признакового пространства по динамическим характеристикам,

что позволяет использовать новые принципы классификации состояний с последующим применением известных подходов к распознаванию образов. Показано, что использование специального ортогонального базиса обеспечивает равномерную сходимость рядов в пространстве кусочно-гладких функций, что позволяет использовать новые принципы оценки закономерностей признакового пространства на основе анализа коэффициентов ортогональных рядов.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Ефанов В. Н., Иванова Н. С.** Интеллектуальные средства оценки технического состояния сложных информационно-управляющих систем // Информационные технологии моделирования и управления. 2008. № 9 (52). С. 1078–1086. [V.N. Efanov, N.S. Ivanova *Intelligent tools to evaluate the technical condition of complex information and management systems*. (in Russian). Informatsionnyie tehnologii modelirovaniya i upravleniya. 2008. Vol. 9 (52), P. 1078-1086.]
2. **Геловани В. А., Башлыков А. А., Бритков В. Б., Вязилов В. Д.** Интеллектуальные системы поддержки принятия решений в нештатных ситуациях с использованием информации о состоянии природной среды. М.: Эдиториал УРСС, 2001. 304 с. [V.A. Gelovani et al. *Intelligent decision support system in emergency situations with the use of information about the state of the environment*. (in Russian). М.: Editorial URSS, 2001. 304 p.]
3. **Ефанов В. Н., Жернаков С. В., Иванова Н. С.** Экспертная система оценки состояния сложных технических объектов // Системы управления и информационные технологии. 2013. № 3(53). С. 4–10. [V. N. Efanov, S. V. Zhernakov, N. S. Ivanova *Expert system assessing the state of complex technical objects*. (in Russian). Sistemyi upravleniya i informatsionnyie tehnologii. 2013; 3(53). P. 4 –10.]
4. **Авдеева З. К., Коврига С. В.** Эвристический метод концептуальной структуризации знаний при формализации слабоструктурированных ситуаций на основе когнитивных карт // Управление большими системами. 2010. № 31. С. 6–34. [Z. K. Avdeeva, S. V. Kovriga *Heuristic method of conceptual knowledge in structuring the formalization of semistructured situations on the basis of cognitive maps*. (in Russian). Upravlenie bolshimi sistemami. 2010, №31. P. 6 –34.]
5. **Авдеева З. К., Коврига С. В.** Диагностирование проблемных ситуаций в развитии сложных систем на основе когнитивных карт // Управление большими системами. 2013. № 42. С. 5–28. [Z. K. Avdeeva, S. V. Kovriga *Diagnosing the problem situations in the development of complex systems based on cognitive maps*. (in Russian). Upravlenie bolshimi sistemami. 2013, № 42. P. 5 –28.].
6. **Гуменюк В. М.** Надежность и диагностика электро-технических систем: учеб. пособие для вузов. Владивосток: Изд-во Дальневост. гос. техн. ун-та, 2010. 218 с. [V.M. Gumenyuk *Reliability and diagnostics of electro-technical systems: Proc. manual for schools*. (in Russian). Izd-vo Dalnevost. gos. tehn. un-ta, 2010. 218 p.]
7. **Колесникова С. И.** Методы распознавания состояний динамических систем // Известия Томского политехнического университета. 2010. Т. 316, № 5. С. 55–62. [S. I. Kolesnikova *Methods of recognition of states of dynamic systems*. (in Russian). Izvestiya Tomskogo politehnicheskogo universiteta. 2010, T. 316. № 5. P. 55 –62.]

8. **Ефанов В. Н., Жернаков С. В., Иванова Н. С.** Идентификация сложных систем управления в ортогональном базисе экспоненциального вида // Вестник УГАТУ: научный журнал УГАТУ. 2010. Т. 14, № 2(37). С. 128–135. [V. N. Efanov, S. V. Zhernakov, N. S. Ivanova *Identification of complex control systems in an orthogonal basis of exponential type*. (in Russian). Vestnik UGATU: nauchnyiy zhurnal UGATU. 2010, T. 14, № 2(37). P. 128 –135].

#### ОБ АВТОРАХ

**ЖЕРНАКОВ Сергей Владимирович**, зав. каф. электроники и биомед. техн. Дипл. инж. по пром. электронике (УГАТУ, 1984). Д-р техн. наук по сист. анализу, упр. и обр. информации (УГАТУ, 2005). Иссл. в обл. интеллектуальных систем.

**ИВАНОВА Наталья Сергеевна**, ст. преп. каф. электроники и биомед. техн. Дипл. инж. по биотехническим аппаратам и системам (УГАТУ, 2005). Иссл. в обл. интеллектуальных систем.



**METADATA**

**Title:** Expert system of estimation of technical condition of aircraft engine using dynamic sets of informative signs.

**Authors:** S.V. Zhernakov, N.S. Ivanova.

**Affiliation:** Ufa State Aviation Technical University (UGATU), Russia.

**Email:** zhsviit@mail.ru, ivanova@ugatu.su.

**Language:** Russian.

**Source:** Vestnik UGATU (scientific journal of Ufa State Aviation Technical University), vol. 21, no. 1(75), pp. 151-159, 2017. ISSN 2225-2789 (Online), ISSN 1992-6502 (Print).

**Abstract:** aircraft engines in the conditions when the idea of the current problematic situation are blurred, unclear and contradictory. Proposed a cognitive model allows for the structuring of the knowledge of experts, expressed as fuzzy categories, and develop on this basis, harmonization of the rules of the views of the expert group to prepare a well-founded assessment of technical condition of the objects. The model is based on a collective causal cognitive map describing the influence, causality and system dynamics factors, symptoms and factors, the reasons for the study of the problem situation. A general scheme of evaluation of the technical condition of aircraft engines, in which implemented a set of interrelated processes of reception and information transformation that occur in the course of specially organized interaction of the object of research, software and hardware monitoring and diagnostics, as well as artificial intellectual environment, which allows to organize actions of experts aimed at an informed choice of appropriate version of the study.

**Key words:** aircraft engine; technical condition; expert system; semistructured situation, cognitive map; formalization; conceptual structuring expertise; dynamic characteristics; orthogonal basis; diagnostic features

**About authors:**

**ZHERNAKOV, Sergey Vladimirovich**, Prof., Head of Dept. of Electronic and Biomedical Engineering. Dipl. Eng. in Industrial Electronics (UGATU, 1984). Dr. of Tech. Sci. (UGATU, 2005). Researches in the field of intellectual systems.

**IVANOVA, Natalya Sergeevna**, senior teacher of the Dept. of Electronic and Biomedical Engineering. Dipl. Eng. in biotechnical devices and systems engineer (UGATU, 2005). Researches in the field of intellectual systems.