

УДК 519.71

ВСТРАИВАЕМЫЕ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ СРЕДСТВА ОЦЕНКИ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ АВИАЦИОННОГО БОРТОВОГО ОБОРУДОВАНИЯ

В. Н. ЕФАНОВ

Факультет авиационного приборостроения УГАТУ
Тел: (3472) 23 77 33 E-mail: efanov@mail.rb.ru

Излагается концепция построения интеллектуальной системы для оценки технического состояния объектов, функционирование которых происходит в условиях неопределенности. Предлагается абстрактная математическая модель процедуры оценивания, на базе которой разрабатывается алгоритм поддержки принятия решений. Обсуждаются вопросы реализации подобных алгоритмов в классе нечетких генетических алгоритмов

Контроль; диагностика; комплекс; оборудование; искусственный интеллект; модель; отображение; генетический алгоритм

ВВЕДЕНИЕ

Постоянное повышение требований к безопасности полетов привело к тому, что современные комплексы бортового электронного оборудования представляют собой отказоустойчивые устройства с многократным резервированием. При их построении используются различные формы избыточности: структурная, информационная, функциональная, которые управляются с помощью разнообразных средств встроенного контроля и диагностики. Все это обеспечило существенное снижение значимости отказов, поскольку не только одиночные, но часто и кратные отказы основных устройств не вызывают катастрофических последствий. В то же время общая интенсивность потока отказов растет пропорционально объему установленного оборудования, как основного, так и находящегося в «горячем» резерве. Возникающие отказы фиксируются средствами встроенного контроля, что требует, в соответствии с существующими инструкциями по эксплуатации, их устранения, в том числе за счет замены и ремонта соответствующего блока. В результате значительно увеличиваются эксплуатационные расходы, которые включают издержки, связанные с задержками рейсов, а также с вынужденными посадками самолетов. Пере-

ход к перспективным интегрированным комплексам авионики только усугубляет сложившуюся ситуацию, поскольку отдельные функциональные устройства не изготавливаются как самостоятельные конструктивные единицы, а реализуются в виде плат в большом вычислительном блоке. Это усложняет процедуру локализации неисправностей и снижает показатели ремонтпригодности оборудования. Кроме того, часто устройства встроенного контроля фиксируют выход определенных параметров за фиксированные пределы только в составе всего взаимодействующего оборудования и не подтверждают нарушения при индивидуальной проверке снятого с борта блока. Еще одной специфической особенностью интегрированных вычислительных комплексов является постоянно растущее число отказов программного обеспечения, которые самоустраиваются после перезагрузки программ в ремонтно-эксплуатационных подразделениях. Все это послужило основанием для широких дискуссий, развернувшихся среди специалистов на 39-й Международной конференции по авионике и электронному оборудованию (39th АИЕМ, Санкт-Петербург, Россия, 1998) и на 50-й Международной конференции по поддержке авионики (50th АМС, Балтимор, США, 1999). Результатом этих дискуссий стала разработ-

ка новой концепции технического обслуживания бортового оборудования, адаптированной к завтрашним интегрированным технологиям. Данная концепция предусматривает разделение возможных отказов на две группы: отказы, влияющие на безопасность полета, и отказы, связанные с потерей избыточных функций оборудования. Отказы первой группы недопустимы. В то же время нет необходимости прерывать полет или выводить самолет из эксплуатации, когда происходят отказы второй группы. Такая схема не только разрешает более экономичное использование самолетного парка, но также предлагает большую надежность расписания полетов, поскольку ремонт производится в удобное для авиакомпании время. Однако практическое применение изложенной концепции требует пересмотра существующих принципов построения устройств встроенного контроля. Наряду с выполнением традиционных функций обнаружения неисправностей, данные устройства должны оценивать возможные последствия отказов и прогнозировать дальнейшее развитие ситуации. Реализация этих функций требует разработки интеллектуальных средств оценки технического состояния с использованием предметно ориентированных экспертных систем.

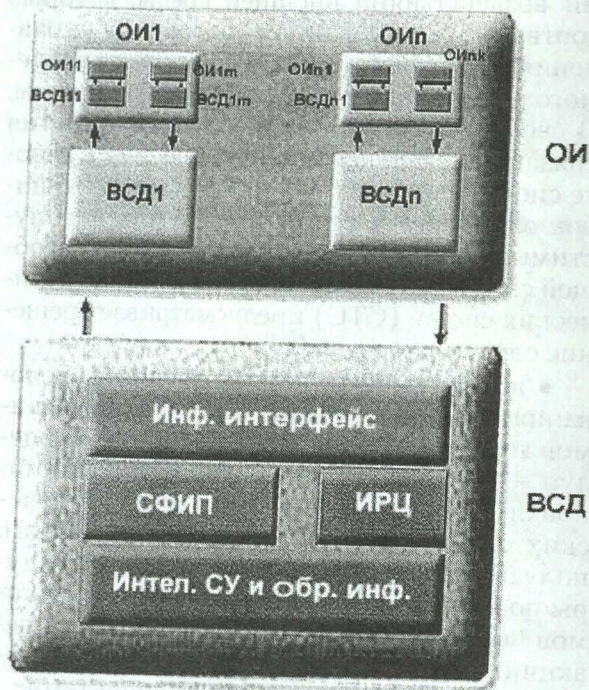
1. АРХИТЕКТУРА ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СИСТЕМЫ ОЦЕНКИ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ АВИАЦИОННОГО БОРТОВОГО ОБОРУДОВАНИЯ

Процедура оценки состояния комплексных систем бортового оборудования представляет собой совокупность взаимосвязанных процессов получения и преобразования информации, которые протекают в ходе специальным образом организованного взаимодействия объекта исследования, программно-аппаратных средств наблюдения и контроля, а также искусственной интеллектуальной среды, позволяющей упорядочить действия человека-оператора, направленные на обоснованный выбор целесообразного варианта исследования, помогающей выявить объективную природу его предпочтений и расширить на этой основе возможности в достоверной оценке предлагаемых вариантов [1]. При этом указанная процедура реализуется непосредственно органами управления бортовых систем и выполняет задачу автоматического обнаружения и оценки контролируемых и неконтролируемых событий, определя-

ющих текущее состояние исследуемой системы. Под контролируруемыми событиями обычно понимают изменения в состоянии объекта управления, вызванные управляющими воздействиями и расчетными возмущающими воздействиями внешней среды, которые соответствуют выбранному алгоритму управления и не препятствуют достижению требуемого результата функционирования системы. В свою очередь, неконтролируемые события связаны с возникновением нарушений в работе системы из-за отказов оборудования, ошибок обслуживающего персонала или недопустимых внешних воздействий. Разработка общей схемы оценки состояния сложных технических систем (СТС) предусматривает решение следующих задач [2]:

- выбора 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;
 - формирования 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;
 - разработки стратегии принятия решения о формировании оптимальной последовательности исследовательских процедур, направленных на достоверную оценку состояния объекта диагностирования или на выявление возможных дефектов в последнем;
 - распределения и выдачи 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 обобщен-

ной функциональной схемы интеллектуальной системы оценки технического состояния авиационного бортового оборудования, представленной на рисунке.



Функциональная схема интеллектуальной системы оценки технического состояния

В состав этой схемы входит многоуровневый, иерархически упорядоченный объект исследования (ОИ) и соответствующая совокупность встроенных систем диагностики (ВСД), каждая из которых предусматривает наличие интеллектуальной системы управления и обработки информации, системы формирования исследовательских процедур (СФИП), интеллектуального распорядительного центра (ИРЦ) и средств информационного интерфейса (ИИ). В свою очередь, объект исследования можно представить в виде определенного набора подобъектов первого уровня $ОИ_1, ОИ_2, \dots, ОИ_n$, что соответствует декомпозиции структуры всего комплекса бортового оборудования на характерные интегрированные комплексы управления полетными заданиями - комбинированные пилотажно-навигационные комплексы, бортовые системы управления полетом и тягой силовых установок, системы управления оружием, комплексные системы предупреждения столкновений, контроля и регистрации, системы управления общесамолетным оборудованием и т.д. Объекты исследования второго

$$\{ОИ_{11}, ОИ_{12}, \dots, ОИ_{1m}\},$$

$$\{ОИ_{21}, ОИ_{22}, \dots, ОИ_{2p}\},$$

$$\dots$$

$$\{ОИ_{n1}, ОИ_{n2}, \dots, ОИ_{nk}\}$$

представляют собой подсистемы, обеспечивающие основные фазы операции, выполняемой летательным аппаратом, — управление взлетом, посадкой, пространственными маневрами, обнаружение и распознавание целей, управление средствами связи и передачи данных. Дальнейшая детализация структуры бортового комплекса приводит к формированию групп устройств, предназначенных для решения основных функциональных задач, — системы инерциальной, ближней, дальней радиотехнической и спутниковой навигации, системы электронной индикации, системы воздушных сигналов, системы предупреждения и предотвращения критических режимов полета, сигнализации об опасной скорости сближения с землей и т.д. Наконец, последний иерархический уровень объединяет совокупность отдельных агрегатов, приборов и устройств бортового оборудования, а также комплексы датчиков первичной пилотажной информации, системы полного и статического давления, параметров силовой установки.

Каждый из перечисленных объектов исследования взаимодействует со своими средствами тестового контроля и функционального диагностирования, которые входят в состав соответствующей СФИП. При этом осуществляемые исследовательские процедуры могут инициироваться ВСД данного уровня или являются составной частью комплексной процедуры исследования, выполняемой под управлением ВСД более высокого уровня. В свою очередь, интеллектуальные системы управления и обработки информации могут обращаться к ВСД нижних уровней иерархии для повышения ситуационной уверенности относительно текущего состояния элементов собственного ОИ. Аналогично этому информация о результатах исследования используется для принятия решений об оценке состояния ОИ, о локализации возможных дефектов и предотвращении их неблагоприятных последствий, например, за счет управления избыточными ресурсами не только в пределах ВСД данного уровня, но и передается в ВСД нижних и верхних уровней. Подобная сложная схема взаимодействия ВСД различных уровней требует разработки достаточно универсальной модели функционирования исследуемой интеллектуальной системы оценки технического состояния СТС, спо-

собной решать поставленные перед ней задачи в условиях, когда на результатах оценки сказывается влияние большого числа факторов, последствия которых нельзя заранее предусмотреть из-за их случайного характера или из-за отсутствия достаточной о них информации.

2. ОБОБЩЕННАЯ МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ СИСТЕМЫ

Ситуация неопределенности является характерной для функционирования ВСД различных уровней и отражает важный методический аспект процедуры оценки состояния СТС, который связан с невозможностью рассчитать поведение сложного технического объекта во всех условиях применения и для всех режимов работы. Для формализации неопределенных факторов и тех исследовательских процедур, которые должны обеспечивать снижение неопределенности до уровня, позволяющего осуществить обоснованную оценку, введем математическую модель исследуемой системы в следующем виде:

$$(U, \Omega_p), \quad (1)$$

где U — непустое множество; Ω_p — множество нечетких предикатов, заданных на множестве U .

В выражении (1) множество U представляет собой декартово произведение $U = X \times Y \times \Gamma$ следующих множеств. Множество $X = \{X_1, X_2, \dots, X_n\}$ представляет собой совокупность детализированных до определенного уровня возможных состояний системы. Множество экспериментов $Y = \{Y_1, Y_2, \dots, Y_m\}$ объединяет все доступные исследовательские процедуры, позволяющие снизить неопределенность в оценке состояний системы. Множество $\Gamma = \{\gamma_1, \gamma_2, \dots, \gamma_m\}$ включает возможные результаты проведенных экспериментов. Алгебраическая структура модели (1) представляет собой совокупность подмножеств множества U , на которой выполняются заданные отображения и формулы соответствующей предметной области. В свою очередь, логическая структура модели объединяет множество нечетких высказываний и правил вывода, которым удовлетворяют отображения и формулы алгебраической структуры.

Для детализации алгебраической структуры введем следующие понятия. Субъектом процедуры оценки состояния СТС назовем элемент $u_0 \in U$, т.е. тройки вида

(X_0, Y_0, Γ_0) , где $X_0 \in X, Y_0 \in Y, \Gamma_0 \in \Gamma$. На множестве субъектов процедуры оценки $u_0 \in U$ введем отображение P : это отображение ставит в соответствие каждой паре «эксперимент–результат» $(Y_0, \Gamma_0) \in Y \times \Gamma$ наиболее правдоподобную оценку состояния $X_0 \in X$ СТС. Отображение $P_0: (Y_0, \Gamma_0) \rightarrow X_0$ назовем элементарной процедурой оценки, а отображение $P_w: w \rightarrow X_w, w \subset Y \times \Gamma, X_w \subset X$ — фрагментом процедуры оценки. Множество частичных операций $F_w = \{f_1, f_2, \dots, f_q\}$, позволяющих сформировать из множеств $\{w_1, w_2, \dots, w_q\}$ и $\{X_1, X_2, \dots, X_q\}$ фрагментов процедуры оценки множество U

$$U = \bigcup_{k=1}^q (X_k \times w_k), \quad (2)$$

назовем правилом (программой) оценки состояния СТС.

Помимо отображений P_w и правил F_w в состав алгебраической структуры входят формулы прикладного характера, определенные на множествах w_k и X_k . Важное место среди указанных формул занимает совокупность оценочных функций $\varepsilon = \{\varepsilon_1, \varepsilon_2, \dots, \varepsilon_p\}$ — совокупность показателей, которая признается важной в отношении оценки состояния исследуемой системы. Величина этих показателей зависит от значений, которые принимают в процессе исследования элементы следующих двух множеств. Множество контролируемых параметров $K = \{K_1, K_2, \dots, K_r\}$ — это совокупность технических характеристик, однозначно описывающих текущее состояние системы. Множество $\Theta = \{\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_s\}$ тактических параметров — это совокупность внешних по отношению к системе условий, непосредственно влияющих на состояние системы.

В свою очередь, логическая структура модели объединяет:

- элементарные (атомарные) формулы вида $X_0 \in X, Y_0 \in Y, \Gamma_0 \in \Gamma$;
- парасочетания вида $P_0: (Y_0, \Gamma_0) \rightarrow X_0$;
- кванторы \exists, \forall , предикатные знаки и скобки;
- нечеткие логические формулы «и» — $\&$; «или» — \vee , импликация \rightarrow («если, то») и т.д.;
- нечеткие правила вывода — трансляционные, модификации и композиции;
- совокупность нечетких многоместных предикатов, которые по определенным правилам сопоставляются с отображениями P_w .

Сформируем теперь на базе введенной обобщенной модели совокупность моделей,

описывающих функционирование основных элементов ВСД различных уровней.

3. МОДЕЛЬ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ И ОБРАБОТКИ ИНФОРМАЦИИ

Данная система формирует общую концепцию проведения исследований применительно ко всем уровням иерархического объекта. В связи с этим получим вначале модель, описывающую процедуру исследования для фиксированного уровня детализации ОИ. Представим отображение P в виде следующей композиции отображений:

$$P = G \otimes Q. \quad (3)$$

Здесь оператор $G: Y \rightarrow \varepsilon$ соответствует операции получения результатов исследования, а $Q: \varepsilon \rightarrow X$ — операции по их анализу. Модель операции исследования в целом будет иметь вид следующего многоместного нечеткого предиката:

$$\langle (Y G \varepsilon) Q X \rangle. \quad (4)$$

Следует также отметить, что операции получения и анализа результатов в условиях неопределенности приобретают ряд специфических особенностей, которые можно учесть в процессе дальнейшей декомпозиции операторов G и Q :

$$G = G_c \otimes G_p \otimes G_{\text{ц}}; \quad Q = Q_{\text{н}} \otimes Q_{\text{п}}. \quad (5)$$

Вновь введенные отображения соответствуют следующим составляющим исследуемой модели.

Модель формирования исходного множества стратегий исследования технического состояния объекта $G_c: A_0(\Omega_Y, \Omega_{\mathcal{R}_Y}, K, \Theta) \rightarrow Y$. Здесь целевое множество A_0 объединяет формализованные характеристики, определяющие цель проводимого исследования и зависящие от располагаемой информации Ω_Y о возможных способах проведения исследований и $\Omega_{\mathcal{R}_Y}$ — о существующих предпочтениях \mathcal{R}_Y при выборе той или иной стратегии исследования, а также от множеств контролируемых и тактических параметров. Решение этой задачи достигается на основе компромисса между двумя противоречивыми требованиями, предъявляемыми к исходному множеству Y . С одной стороны, это множество должно быть достаточно широким, чтобы обеспечить требуемый объем информации о состоянии

исследуемого объекта. С другой стороны, объем проводимых исследований ограничивается располагаемыми (временными, материальными) ресурсами. Достижение компромисса подобного рода может быть обеспечено путем реализации следующей трехэтапной процедуры:

$$\begin{aligned} & \langle A_0(\Omega_Y, \Omega_{\mathcal{R}_Y}, K, \Theta) G_c^A Y_A \rangle \rightarrow \\ & \rightarrow \langle A_0(Y_A, \Omega_R, \Omega_{\mathcal{R}_Y}, K, \Theta) G_c^B Y_B \rangle \rightarrow \\ & \rightarrow \langle A_0(Y_B, \Omega_\varepsilon, \Omega_{\mathcal{R}_Y}, K, \Theta) G_c^C Y_C \rangle. \end{aligned}$$

На первом этапе этой процедуры выбираются все эксперименты Y_A , которые в принципе способствуют достижению поставленной цели исследования. На втором этапе формируется подмножество $Y_B \subseteq Y_A$ физически реализуемых экспериментов, т.е. те эксперименты, которые могут быть выполнены в рамках имеющихся ресурсов R . Наконец, на третьем этапе предпочтение отдается множеству $Y_C \subseteq Y_B$ эффективных (недоминируемых по принятому векторному критерию ε) стратегий.

Модель результатов проведенных экспериментов $G_p: \{Y_C | \Xi\} \rightarrow F(\Gamma)$, где $F(\Gamma)$ — вектор признаков результата Γ , $\Xi = \{\Omega_{A_0}, \Omega_{\mathcal{R}_Y}, \Omega_{\mathcal{R}_\Gamma}, K, \Theta\}$.

Модель достижения цели проведенных исследований предназначается для формирования количественных оценок, необходимых при принятии решения о техническом состоянии исследуемого объекта. В рамках рассматриваемого подхода формальная модель такого рода задается отображением следующего вида: $G_{\text{ц}}: \{F(\Gamma) | \Psi\} \rightarrow \varepsilon$, где $\Psi = \{\Omega_{A_0}, \Omega_{\mathcal{R}_\varepsilon}, Y, K, \Theta\}$.

Модель анализа неопределенностей $Q_{\text{н}}: \Omega_{A_0} \rightarrow \{\Omega_\Theta, \Theta\}$ позволяет сформировать массив данных о типах и характеристиках тех неопределенных факторов, существование которых обусловлено целевым предназначением исследуемого объекта. Как правило, неопределенные факторы, характерные для задач исследования бортовых авиационных систем, можно разделить на следующие группы: случайные и неслучайные, устранимые и неустраиваемые. Учет специфики неопределенных факторов позволяет выбрать правильную тактику устранения их неблагоприятных последствий.

Модель анализа предпочтений является важнейшим элементом, обеспечивающим функционирование интеллектуального распределительного центра [3]. Априорно выяв-

ленная система предпочтений может изменяться в процессе функционирования ВСД, охватывая большинство реализуемых исследовательских процедур. В связи с этим обобщенная модель предпочтений записывается в следующем виде: $Q_{\Pi}: H \rightarrow \mathfrak{R}_H$, где $H = \{X, Y, \Gamma, F, K, \Theta, \varepsilon\}$.

Рассмотрим теперь многоуровневую модель интеллектуальной системы управления и обработки информации, обобщая модель (4) на ВСД всех уровней:

$$\begin{aligned} & \forall Y \exists G_1 \exists Q_1 \langle \langle Y_1 G_1 \varepsilon_1 \rangle Q_1 X_1 \rangle \rightarrow \\ & \rightarrow \forall Y_1 \exists G_2 \exists Q_2 \langle \langle Y_2 G_2 \varepsilon_2 \rangle Q_2 X_2 \rangle \rightarrow \dots \\ & \dots \rightarrow \forall Y_{N-1} \exists G_N \exists Q_N \langle \langle Y_N G_N \varepsilon_N \rangle Q_N X_N \rangle, \end{aligned} \quad (6)$$

где N — число иерархических уровней ОИ.

Модель (6) отражает два взаимосвязанных процесса: сокращение множества Y_i допустимых стратегий исследования при переходе на очередной i -й уровень иерархии ОИ и увеличение информации о состоянии последнего по мере детализации его структуры, что находит свое выражение в расширении множества $\{X_1, X_2, \dots, X_i\}$.

4. МОДЕЛЬ СИСТЕМЫ ФОРМИРОВАНИЯ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИХ ПРОЦЕДУР

Данная система формирует всю совокупность предписаний в виде последовательности проверок и правил обработки их результатов с целью оценки технического состояния ОИ. Существующие алгоритмы тестовых проверок и функционального диагностирования делят на следующие категории:

- безусловные алгоритмы задают фиксированную последовательность проверок, которые поочередно выполняются от начала до конца независимо от их результатов;
- условные алгоритмы предусматривают возможность остановки в любой точке исследовательской процедуры при появлении определенных признаков или при достижении заданных параметров проверок.

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.

Отмеченные особенности исследовательских процедур позволяют конкретизировать модели операций получения и анализа результатов. Поскольку любой алгоритм исследования в конечном счете направлен на то, чтобы контролировать процесс изменения состояний изучаемого объекта, то введем в рассмотрение множество его переменных состояний $Z(X)$. Тогда процесс изменения состояний объекта во времени можно описать следующим отображением:

$$\mathfrak{Z}: Z(X) \times Y \times T \times K \times \Theta \rightarrow Z(X). \quad (7)$$

Этому отображению ставится в соответствие процедура определения результатов проведенных экспериментов:

$$\mathfrak{N}: Z(X) \times Y \times T \times K \times \Theta \rightarrow F(\Gamma). \quad (8)$$

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 таким образом:

$$\Delta: F(\Gamma) \rightarrow \varepsilon. \quad (9)$$

Объединение (8) и (9) дает уже упоминавшуюся модель операции получения результатов исследования, которая теперь приобретает следующий вид:

$$G = \Delta \otimes \mathfrak{N}: \{Y | \mathfrak{N}: Z(X) \times Y \times T \times K \times \Theta \rightarrow F(\Gamma)\} \rightarrow \varepsilon. \quad (10)$$

5. МОДЕЛЬ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОГО РАСПОРЯДИТЕЛЬНОГО ЦЕНТРА

В интеллектуальном распорядительном центре решается задача принятия решений

$$\langle \langle \{A_0, Y, \varepsilon, K, \Theta\} \Phi \{Y^*, \Gamma^*\} \rangle \rangle \text{ПХ}^*, \quad (11)$$

которая формулируется следующим образом: необходимо выбрать в условиях риска и неопределенности оптимальную стратегию Y^* на множестве эффективных стратегий Y , используя критерий ε , и, получив результат Γ^* оптимального эксперимента, найти наиболее обоснованную оценку X^* состояния исследуемого объекта.

Операция выработки решения состоит из трех этапов [4]: этапа прогнозирования, этапа оценки и этапа принятия решения.

Этап прогнозирования представляет собой исследовательский процесс, целью которого является уменьшение влияния неопределенности на результаты оценки. Для формализации неопределенных факторов используются соответствующие функции принадлежности. Так, для неопределенных тактических параметров вводятся функции принадлежности $f(\Theta)$, представляющие суждения эксперта об относительном правдоподобии значений элементов множества Θ при оценке исследуемого состояния системы. В свою очередь, множеству Γ ставится в соответствие совокупность условных функций принадлежности $g_i(\Gamma/\Theta)$, выражающих суждения эксперта о возможности получения данного результата Γ в процессе осуществления эксперимента Y_i , при условии, что тактические параметры приняли значение Θ . Итогом этапа прогнозирования служит формирование совокупности оценочных функций, отражающих субъективное мнение эксперта, которое образовалось в результате анализа возможных исходов экспериментов при учете неопределенных факторов

$$\varepsilon_l = \varepsilon_l(X_i, \Theta, \Gamma, Y_j, K), \quad l = 1, 2, \dots, p. \quad (12)$$

Этап оценки включает в себя математическую обработку сформированных функций принадлежности в соответствии с возможными результатами экспериментов и предусматривает последующий выбор оптимального эксперимента из заданной совокупности. Подобная организация исследований вытекает из следующих соображений. Необходимым условием успешного осуществления процедуры оценки в условиях неопределенности является постоянное накопление информации о свойствах исследуемого объекта. Процесс накопления информации находит свое выражение в изменении суждений эксперта относительно оценки текущего состояния объекта, а также о правдоподобии возможных значений, принимаемых неопределенными величинами. Достоверность оценки возрастает, при прочих равных условиях, по мере увеличения объема экспериментальных исследований. Однако, как отмечалось выше, осуществлять все мыслимые эксперименты не всегда возможно и оправданно. В связи с этим необходимо учесть мнение эксперта о целесообразности проведения той или иной совокупности экспериментов. Реализация этого требования предполагает выполнение следующей последовательности действий.

Вначале формируются функции принадлежности $\varphi(\Theta/\Gamma, Y)$ и $\varphi(\Gamma/Y)$. Далее опреде-

ляются нечеткие ожидания оценочных функций применительно ко всем выявленным состояниям объекта

$$\begin{aligned} \varepsilon(X, \Gamma, Y, K) &= \\ &= \int_{\Omega} \varepsilon(X, \Theta, \Gamma, Y, K) \varphi(\Theta/\Gamma, Y) d\Theta, \end{aligned} \quad (13)$$

на основе которых формируется приоритетное множество возможных состояний

$$\varepsilon(\Gamma, Y, K) = \text{extr}_{X_i \in X} \varepsilon(X, \Gamma, Y, K) \quad (14)$$

и вычисляются его оценки

$$\varepsilon(Y, K) = \int_{\Gamma} \varepsilon(\Gamma, Y, K) \varphi(\Gamma/Y) d\Gamma. \quad (15)$$

Полученные значения оценочных функций используются для выбора оптимального эксперимента, обеспечивающего наилучшую ожидаемую величину этого критерия

$$\varepsilon^*(K) = \text{extr} \varepsilon(Y, K) \text{ по всем } Y_i \in Y. \quad (16)$$

Этап принятия решения — завершающая стадия операции выбора, на которой осуществляется найденный оптимальный эксперимент Y_j^* и фиксируется его результат Γ^* . С учетом осуществления оптимального эксперимента определяется состояние объекта, для которого ожидаемое значение критерия будет максимальным:

$$\begin{aligned} \varepsilon(X_i^*, \Gamma^*, Y_j^*, K) &= \\ &= \text{extr}_{X_i \in X} \varepsilon(X_i, \Gamma^*, Y_j^*, K). \end{aligned} \quad (17)$$

Реализация в рамках описанной процедуры операций выбора (14), (16) и (17) требует решения задач дискретной оптимизации большой размерности. С этой целью в последнее время широко используются генетические алгоритмы [5].

Суть предлагаемого мобильного генетического алгоритма сводится к следующим положениям. Номера возможных состояний системы и осуществляемых экспериментов кодируются в виде составной хромосомы $\{s^{(X)}, s^{(Y)}\}$ с помощью стандартного двоичного кода, например кода Грея. Состав начальной популяции формируется на основе случайной выборки с равномерным законом распределения. Отбор производится с использованием специально разработанного алгоритма случайного поиска с адаптацией. В

процессе поиска осуществляется моделирование нормального закона распределения вероятности отбора, математическое ожидание которого принимается равным значению функции пригодности наилучшей для данного поколения хромосомы популяции. В свою очередь, дисперсия распределения меняется в зависимости от предыстории поиска. Если в очередном поколении произошла смена наилучшей хромосомы, то дисперсия принимает максимальное значение, расширяя тем самым диапазон поиска. Если на протяжении нескольких поколений более предпочтительная хромосома не находится, то дисперсия уменьшается, в простейшем случае пропорционально числу поколений. Тем самым формируются предпосылки для элитного отбора, сохраняющего наилучшую из найденных хромосом популяции. Специфика исследуемой задачи оптимизации обуславливает целесообразность глубокой рекомбинации хромосом с многоточечным или равномерным кроссинговером, а также с использованием мутаций в форме инверсий значительных участков хромосом. Мобильность алгоритма позволяет осуществлять «сцепление» (splice) отдельных участков хромосом, соответствующих различным уровням детализации исследуемой системы. Таким образом, после завершения программы исследований в подобной хромосоме переменной длины оказывается закодированная информация о состоянии как всей системы в целом, так и отдельных подсистем с требуемой глубиной контроля.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Ефанов В.Н., Жданов О.Э.** Процедуры экспертного оценивания эффективности интегрированных комплексов бортового оборудования // Аэрокосмическое приборостроение России. Сер. 2. Авионика. Вып. 3. СПб., 1999. С. 3–16.
2. **Мозгалевский А.В., Калявин В.П., Костанди Г.Г.** Диагностирование электронных схем. Л.: Судостроение, 1984. 224 с.
3. **Трухаев Р.И.** Модели принятия решений в условиях неопределенности. М.: Наука, 1981. 258 с.
4. **Ефанов В.Н., Аль-вади Нассир Хуссейн.** Интеллектуальная процедура оценки состояния сложных технических систем с использованием нечетких генетических алгоритмов // Аналитическая теория автоматического управления и ее приложения: Тр. междунар. науч. конф. Саратов, 2000. С. 178–182.
5. **Скурихин А.Н.** Генетические алгоритмы // Новости искусственного интеллекта. 1995. № 4. С. 6–46.

ОБ АВТОРЕ

Ефанов Владимир Николаевич, профессор, зав. кафедрой авиационного приборостроения УГАТУ. Дипл. инженер по промышленной электронике (УАИ, 1973), д-р техн. наук по управлению в технических системах (УГАТУ, 1995). Исследования в области создания интеллектуализированных комплексов бортового оборудования.

