

УДК 681.518.5:004.421.4

Doi: 10.31772/2712-8970-2021-22-2-275-287

Для цитирования: Подкопаев А. В., Подкопаев И. А. Централизованный адаптивный алгоритм процедуры оптимального условного поиска места отказа динамических систем // Сибирский аэрокосмический журнал. 2021. Т. 22, № 2. С. 275–287. Doi: 10.31772/2712-8970-2021-22-2-275-287.

For citation: Podkopaev A. V., Podkopaev I. A. Centralized adaptive algorithm for the procedure of optimal conditional search for the place of failure of dynamic systems. *Siberian Aerospace Journal*. 2021, Vol. 22, No. 2, P. 275–287. Doi: 10.31772/2712-8970-2021-22-2-275-287.

Централизованный адаптивный алгоритм процедуры оптимального условного поиска места отказа динамических систем

А. В. Подкопаев^{1*}, И. А. Подкопаев²

¹Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил
«Военно-воздушная академия имени профессора Н. Е. Жуковского и Ю. А. Гагарина»
Российская Федерация, 394064, г. Воронеж, ул. Старых большевиков, 54а

²Государственный летно-испытательный центр имени В. П. Чкалова
Российская Федерация, 141110, Московская область, г. Щелково-10, войсковая часть 27237

*E-mail: aleksanpodkopaev@mail.ru

Современные и перспективные динамические системы комплексов авиационного вооружения Воздушно-космических сил (далее – системы) характеризуются усложнением структуры и повышением требований к надежности и эффективности функционирования. Более того, системы поколения 4++ и 5 достаточно уникальны и (или) малосерийны, а составляющие их элементы в своей основе миниатюрны и дороги, поэтому необходимым условием при выполнении требований контролепригодности к системам и составляющим элементам является максимально возможное сохранение качества исходного базиса при неизбежной новой трактовке дополнительной информации. Дальнейшее внедрение в практику решения задач технической диагностики (ТД) технологий искусственного интеллекта позволяет получать адекватные результаты практически с любой точностью. Достоверность результатов будет определяться исключительно пунктуальностью задания данных и полнотой математического описания систем, процессов и событий рассматриваемой предметной области. Поэтому следует ожидать, что дальнейшее развитие теории и практики ТД будет идти по пути более глубокого изучения физических процессов, происходящих в системах, и более точного математического задания процедур поиска места отказа систем. Целью работы установлена разработка взаимосвязанной совокупности математических и логических блок-схем получения и применения диагностических знаний в программно-математическом обеспечении современных и перспективных бортовых средств контроля технического состояния (ТС) систем. Приоритетным направлением в подобных исследованиях является дифференцированная селекция апробированных методов ТД с выбором соответствующего математического и алгоритмического аппарата прямого вероятностного моделирования систем. Представлена блок-схема и рассмотрен вариант практического приложения разработанного алгоритма последовательного распознавания отказов систем (далее – алгоритм, если из контекста изложения материала ясно, что речь идет именно о разработанном алгоритме). С применением алгоритма отсутствует необходимость в декомпозиции систем, а потенциал многократных повторений результатов случайного процесса смены ТС систем предопределяет возможность получения больших выборок с высокой точностью программной компиляции.

Ключевые слова: элементарная проверка, диагностический признак (ДП), вероятность класса ТС системы, метод поиска места отказа системы, метод принятия решения, средний риск принятия решения технического диагностирования.

Centralized adaptive algorithm for the procedure of optimal conditional search for the place of failure of dynamic systems

A. V. Podkopaev^{1*}, I. A. Podkopaev²

¹Air Force Military educational and scientific center

“Air Force academy named after professor N. E. Zhukovsky and Y.A. Gagarin”

54a, Starykh bol'shevikov St., Voronezh, 394064, Russian Federation

²State flight test center named after V. P. Chkalov

military unit 27237, Moscow region, Shchelkovo-10, 141110, Russian Federation

*E-mail: aleksanpodkopaev@mail.ru

Modern and promising dynamic systems of aviation weapon systems of the Aerospace Forces (hereinafter for brevity in the text – the system) are characterized by a more complex structure and increased requirements for reliability and efficiency of functioning. Moreover, systems of generation 4 ++ and 5 are quite unique and (or) small-scale, and their constituent elements are basically miniature and expensive, therefore, a prerequisite for fulfilling the requirements for traceability to systems and constituent elements is the maximum possible preservation of the quality of the initial basis with the inevitable new interpretation of additional information. Further introduction of artificial intelligence technologies into the practice of solving problems of technical diagnostics makes it possible to obtain adequate results with almost any accuracy. The reliability of the results will be determined solely by the punctuality of the data assignment and the completeness of the mathematical description of systems, processes and events in the subject area under consideration. Therefore, it should be expected that the further development of the theory and practice of technical diagnostics will follow the path of a deeper study of the physical processes occurring in systems, and a more accurate mathematical specification of procedures for finding the place of failure of systems. The aim of the work is to establish the development of an interconnected set of mathematical and logical block diagrams for obtaining and applying diagnostic knowledge in the software and mathematical support of modern and advanced onboard means of monitoring the technical state of systems. The priority direction in such studies is the differentiated selection of approved methods of technical diagnostics with the choice of the appropriate mathematical and algorithmic apparatus for direct probabilistic modeling of systems. A block diagram is presented and a variant of the practical application of the developed algorithm for sequential recognition of system failures (hereinafter referred to as an algorithm, if it is clear from the context of the presentation of the material that it is the developed algorithm) is considered. By using the algorithm, there is no need for decomposition of systems, and the potential for multiple repetitions of the results of a random process of changing the technical states of systems predetermines the possibility of obtaining large samples with high accuracy of software compilation.

Keywords: elementary check, diagnostic sign, probability of a class of the technical condition of the system, method for finding the place of a system failure, decision method, average risk of making a technical diagnosis decision.

Введение

Программы Министерства обороны Российской Федерации, направленные на повышение качества управления ТС образцов вооружения и военной (специальной) техники применяются при поддержании и восстановлении исправного (работоспособного) состояния различных

типов систем. Вместе с тем анализ свойств систем вида [1; 2], результаты научных исследований теории, методов и средств определения ТС систем [3; 4] показали, что сложность систем достигла в настоящее время такого уровня, при котором в большинстве случаев отдельный человек-эксперт или группа экспертов не в состоянии полно и точно обрабатывать объемы информации о неоднородных процессах, происходящих при функционировании, повреждениях и отказах систем. Следовательно, дальнейшее развитие ТД как необходимой составляющей процесса управления ТС систем представляется расширением базы теоретических основ и их практических приложений, ориентированных на частичную или полную передачу аналитических функций эксперта от человека-оператора машине.

Важная роль при этом отводится совершенствованию алгоритмов, обеспечивающих максимальную автоматизацию оптимальных операций поиска места отказа систем.

Алгоритмы вероятностного моделирования задач комбинаторного и последовательного распознавания отказов систем разработаны весьма детально и рассмотрены в специальной литературе, например [5; 6]. Отметим и полезный обзор современных результатов в предметной области. Так, в статьях [7; 8] предложены алгоритмы идентификации дефектов и оценки их влияния на безопасность эксплуатации систем с использованием правил логического вывода и формального концептуального анализа; в работе [9] разработаны алгоритмы ТД компрессоров авиационных газотурбинных двигателей с использованием параметров, обладающих высокой чувствительностью к изменениям ТС объекта контроля; в труде [10] приведены оригинальные алгоритмы индивидуальной и групповой диагностик функционирования информационно-измерительных комплексов учета электроэнергии; публикация [11] аргументирует возможность применения достижений нейросетевых технологий в алгоритмах ТД цифровых систем.

С учетом актуализации стратегии управления ТС по состоянию и смешанной стратегии управления ТС, а также процессов повышения значений коэффициента готовности систем военного назначения, [2] в качестве наиболее естественной, практически осуществимой формы, удовлетворяющей современным требованиям, обусловим целесообразность дальнейшего совершенствования процедуры распознавания отказов разработкой алгоритма, обладающего свойствами централизованности и адаптации. Блок «принятие решения» такого алгоритма рассматривается как центральный, обеспечивающий функции регулятора при применении предлагаемого алгоритма по назначению. Свойство адаптации отражает то обстоятельство, что формирование ветвей подобного алгоритма осуществляется, исходя из возможных структур систем, а связи между ветвями процедуры условного поиска места отказа систем реализуются на основе оптимального сочетания всех алгоритмических блоков.

Представление исходных данных и основного результата

При реализации структуры и содержания алгоритма задействован аппарат теории распознавания образов и осуществлено применение инструментов прямого вероятностного (имитационного) моделирования, при которых алгоритм воспроизводит, имитирует реальные действия человека, являющиеся случайно зависимыми от вида априорной информации и структуры системы.

Исходя из классических формулировок задачи оптимального поиска места отказа систем [12], синтезированный алгоритм представлен в виде блок-схемы операторов, отдельные из которых отображают достаточно крупную группу элементарных арифметических и логических операций, как показано на рис. 1.

Разработанный алгоритм функционирует на основе исходных данных, систематизируемых в операторе 2.

Исследуемая система, относящаяся к классу динамических систем, представляется в так называемой теории систем моделью «вход – состояние – выход» [12–14].

$$E = (T, X, Y, Z, A, F), \quad (1)$$

где T – множество моментов времени t ; X – множество входных сигналов системы x ; Y – множество выходных сигналов системы y ; Z – множество переменных состояния системы z ; A – оператор выходов, описывающий механизм формирования выходного сигнала как реакции системы на внутренние и внешние возмущения; F – оператор переходов, отражающий изменение состояния системы под действием внутренних и внешних возмущений.

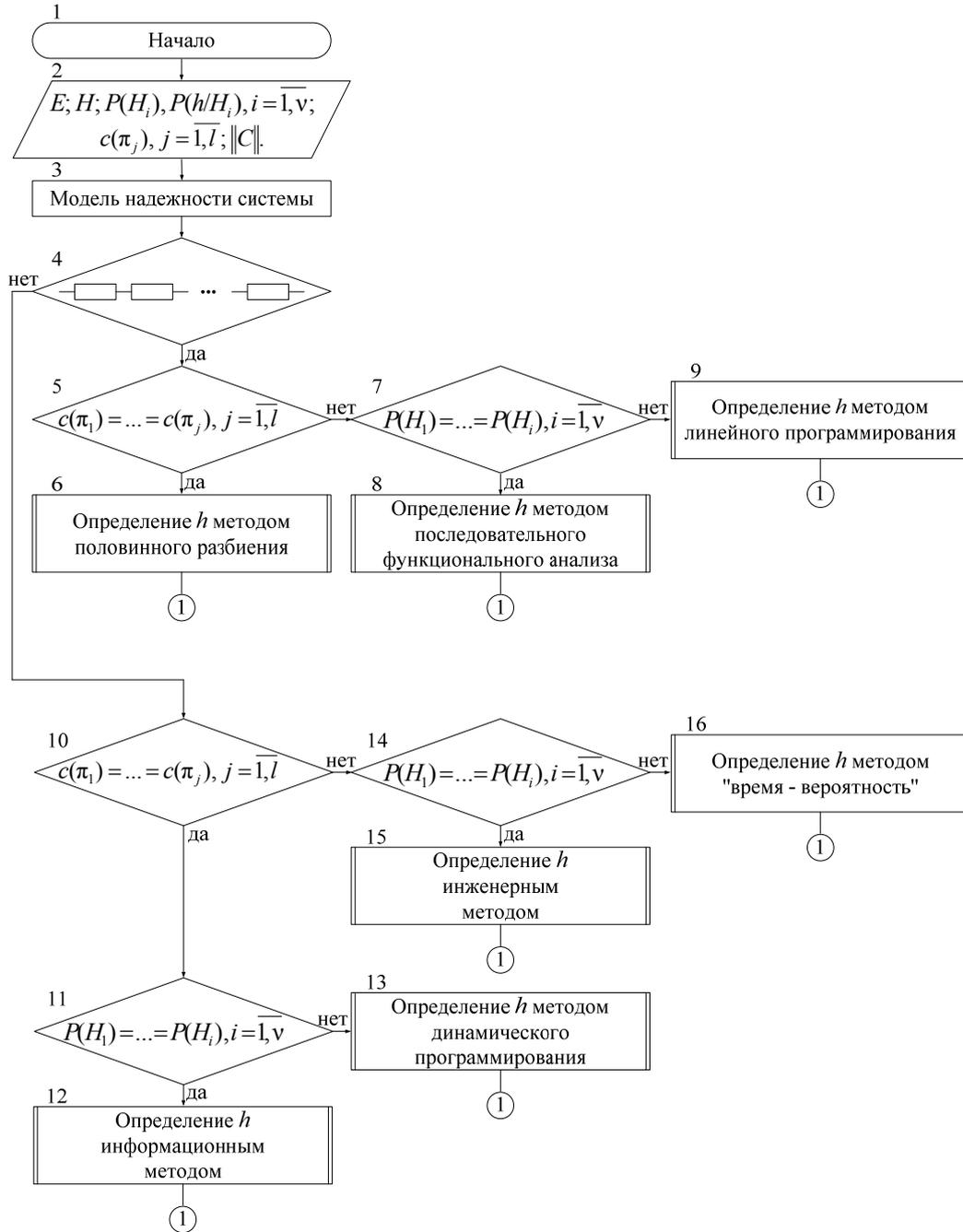


Рис. 1. Блок-схема оптимального условного алгоритма поиска места отказа динамических систем (Начало)

Fig. 1. Block diagram of the optimal conditional algorithm for finding the place of failure of dynamic systems (Beginning)

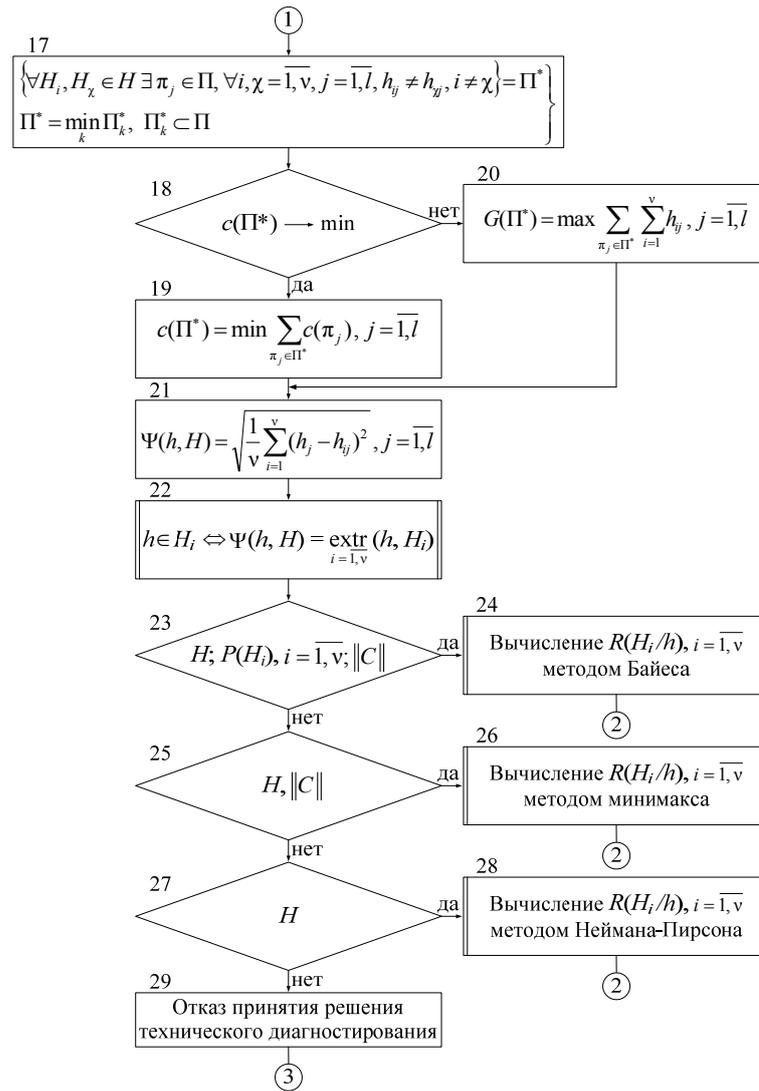


Рис. 1. Продолжение (начало на с. 277)

Fig. 1. Continued (beginning on p. 277)

Для организации распознавания отказов необходимо использование заранее образованного опорного словаря ДП, число описаний в котором должно быть равно заданному числу v определяемых i -х классов ТС системы, $i = \overline{1, v}$. Словарь ДП системы, образованный в форме, удобной для дальнейших действий, представлен в виде векторов

$$H_i = (h_{i1}, h_{i2}, \dots, h_{ij}, \dots, h_{il}), i = \overline{1, v}, \quad (2)$$

компонентами которых являются опорные j -е (из общего числа l) ДП h_{i1}, \dots, h_{il} любого типа, описывающие свойства системы данного класса ТС $H_i, i = \overline{1, v}$.

Известно, что j -й ДП $h_{ij}, j = \overline{1, l}$ означает возможный исход элементарной проверки в i -м классе ТС системы и показывает, каким должен быть исход элементарной проверки, если состояние системы принадлежит i -му классу ТС [12]. Поэтому для обозначения элементарной проверки использован символ π с одноименным для числа ДП индексом $j - \pi_j, j = \overline{1, l}$, а для краткости элементарная проверка в дальнейшем называется просто проверкой.

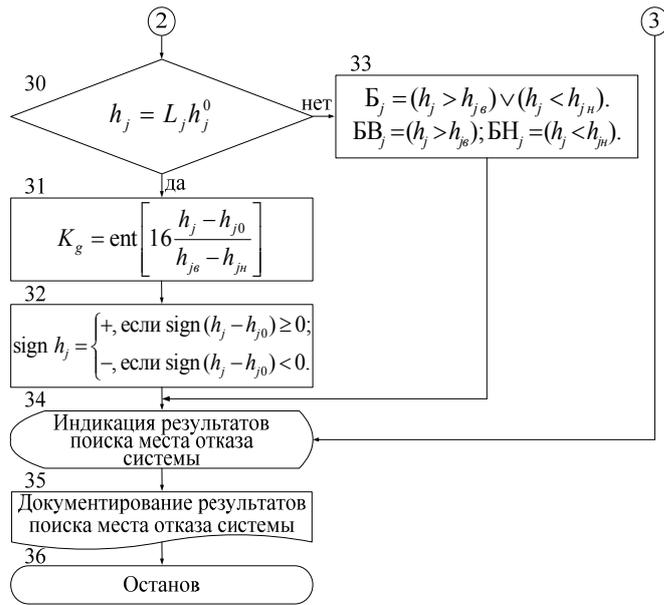


Рис. 1. Окончание (начало на с. 277)

Fig. 1. End (beginning on p. 277)

Здесь же следует отметить, что описания классов, сформированные на стадии предварительного изучения свойств систем, не остаются неизменными. Они обычно уточняются по результатам распознавания вновь создаваемых или модернизируемых систем, что обуславливает открытую архитектуру алгоритма.

Множеством заданных классов, полученным по окончании процесса обучения, формируется массив алфавита классов ТС системы по математической формулировке, подобный формуле (2), но представляющий ее в виде, исключающем ошибки программирования

$$H = \begin{pmatrix} h_{11} & h_{12} & \dots & h_{1j} & \dots & h_{1l} \\ h_{21} & h_{22} & \dots & h_{2j} & \dots & h_{2l} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ h_{i1} & h_{i2} & \dots & h_{ij} & \dots & h_{il} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ h_{\chi 1} & h_{\chi 2} & \dots & h_{\chi j} & \dots & h_{\chi l} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ h_{v1} & h_{v2} & \dots & h_{vj} & \dots & h_{vl} \end{pmatrix}. \quad (3)$$

Алфавит классов (3) предполагает существование максимального количества отдельных классов, соответствующих неработоспособным состояниям системы. Предполагается также, что распознавание отказов производится на множестве указанных ДП и что их числа достаточно для правильной классификации всех неработоспособных состояний системы.

По своей природе все состояния систем представляют собой случайные события, обусловленные случайностью отказов отдельных элементов и другими случайными факторами. В этих условиях, вообще говоря, необходимо рассмотрение задачи ТД в вероятностной постановке, а ее решение в рамках применения вероятностных методов принятия решений, предполагающих наличие информации, задающей:

- вероятности i -х классов ТС системы $P(H_i)$, $i = \overline{1, v}$;
- вероятности появления изображений системы h при нахождении системы в i -х классах ТС $P(h/H_i)$; $i = \overline{1, v}$;
- цены j -х проверок $c(\pi_j)$, $j = \overline{1, l}$.

Кроме того, в структуре исходных данных, формируемых в операторе 2, в обязательном порядке предусматривается наличие платежной матрицы, назначающей средние потери при правильных и ошибочных решениях технического диагностирования, получаемой на этапе обучения системы

$$\|C\| = \begin{vmatrix} c_{11} & c_{12} & \dots & c_{1v} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ c_{v1} & c_{v2} & \dots & c_{vv} \end{vmatrix}. \quad (4)$$

По главной диагонали платежной матрицы (4) расположены потери при правильных решениях, по правую сторону от главной диагонали – потери, связанные с ошибками I-го рода, по левую – потери, связанные с ошибками II-го рода [15].

По завершению процесса ввода исходных данных, с применением оператора 3 производится анализ взаимодействия элементов между собой в пространственно-временной организации системы, определяющей виды, характер связей и отношений между элементами. Оператор 3 является типовым для идентификации последовательной модели надежности системы или иной структуры соединения элементов и предназначен для определения условий применимости одного из известных методов поиска места отказа системы. Для структуризации системы могут быть использованы фреймы – конструкции описания некоторой системы, обладающей теми или иными свойствами и хранящие всю информацию о свойствах и отношениях системы [4]. В целом, такой анализ является промежуточным этапом решения задачи ТД на вычислительной машине.

Далее функционирует группа операторов 4–16, предназначенная для воспроизведения метода распознавания отказов и определения изображения системы, которое по аналогии со словарем ДП (2) представлено в виде векторов

$$h = (h_1, h_2, \dots, h_j, \dots, h_l). \quad (5)$$

где h_1, \dots, h_l – признаки любого вида, получаемые в результате выполнения проверок π_j , $j = \overline{1, l}$.

Очевидно, что признаки h_{ij} , $i = \overline{1, v}$, $j = \overline{1, l}$ из словаря ДП системы (2) и признаки h_j , $j = \overline{1, l}$ из изображения системы (5) предполагают сопоставимые единицы измерений и идентичную форму, допускающую их сравнение.

Логический оператор 4 обеспечивает разветвление общей процедуры распознавания отказа в зависимости от идентификации структуры системы.

При последовательном соединении элементов в системе, оператором 5 проверяется условие равенства цен выполняемых проверок. При выполнении условия $c(\pi_1) = c(\pi_2) = \dots = c(\pi_j)$ получение множества проверок $\Pi = \{ \pi_1, \pi_2, \dots, \pi_j \}$, $j = \overline{1, l}$ и окончательное формирование изображения системы h вида (5) осуществляется применением программы метода половинного разбиения [6], вводимой оператором 6. Здесь заметим, что условия применимости метода половинного разбиения не ограничены требованиями к равенству вероятностей классов ТС системы $P(H_i)$, $i = \overline{1, v}$.

Если условие $c(\pi_1) = c(\pi_2) = \dots = c(\pi_j)$, $j = \overline{1, l}$ не выполняется, то оператор 7 независимо от предыдущего цикла проверяет равенство вероятностей классов ТС системы, $P(H_1) = P(H_2) = \dots = P(H_i)$, $i = \overline{1, v}$ и подключает оператор 8, реализующий программу метода последовательного функционального анализа [5]. Невыполнение условий $c(\pi_1) = c(\pi_2) = \dots = c(\pi_j)$, $j = \overline{1, l}$ и $P(H_1) = P(H_2) = \dots = P(H_i)$, $i = \overline{1, v}$ означает выбор программы распознавания отказа методом линейного программирования [12], содержащейся в операторе 9.

При смешанной структуре соединения элементов в системе, управление от оператора 4 передается непосредственно оператору 10, который при равенстве цен выполняемых проверок, $c(\pi_1) = c(\pi_2) = \dots = c(\pi_j)$, $j = \overline{1, l}$, запрашивает оператор 11. При равенстве вероятностей классов ТС системы, $P(H_1) = P(H_2) = \dots = P(H_i)$, $i = \overline{1, v}$, получение множества проверок $\Pi = \{ \pi_1, \pi_2, \dots, \pi_j \}$, $j = \overline{1, l}$ и итоговое формирование изображения системы h вида (5) осуществляется применением программы информационного метода [6].

Отсутствие условий применимости информационного метода приводит к необходимости включения в процесс функционирования алгоритма оператора 13, синтезирующего метод динамического программирования распознавания отказов [6].

Если при смешанной структуре соединения элементов в системе условие $c(\pi_1) = c(\pi_2) = \dots = c(\pi_j)$, $j = \overline{1, l}$ не выполняется, то оператор 14 проверяет равенство вероятностей классов ТС системы, $P(H_1) = P(H_2) = \dots = P(H_i)$, $i = \overline{1, v}$, и подключает оператор 15, реализующий программу «инженерного» метода поиска места отказа системы [5]. Если цены проверок не равны, $c(\pi_1) \neq c(\pi_2) = \dots \neq c(\pi_j)$, $j = \overline{1, l}$, и вероятности классов ТС системы не одинаковы, $P(H_1) \neq P(H_2) \neq \dots \neq P(H_i)$, $i = \overline{1, v}$, то для установления множества проверок $\Pi = \{ \pi_1, \pi_2, \dots, \pi_j \}$, $j = \overline{1, l}$ и определения изображения системы h вида (5) выбирается метод «время – вероятность» [5], содержащийся в операторе 16.

Таким образом, функционирование группы операторов 4–16 выполняется в условиях активного эксперимента, что диктует необходимость формирования определенных требований оптимальности для конкретных условий контроля ТС систем.

Требования оптимизации множества проверок предъявлены на основе условия попарной различимости ТС системы, дополненного ограничениями на нахождение оптимального подмножества $\Pi_k^* \subset \Pi$, такого, чтобы разрешались формулировки [12], представленные в операторе 17.

Условие оператора 17 определяет заданное число проверок, необходимых для определения i -го ТС системы и требует, чтобы в искомом подмножестве Π^* нашлась хотя бы одна проверка π_j , такая, чтобы любые два словаря ДП H_i и H_χ , $\forall i, \chi = \overline{1, v}$, $i \neq \chi$, были попарно различимы по результатам этой проверки и чтобы это подмножество было минимальным из всех возможных.

В общем случае может быть найдено несколько подмножеств Π^* , удовлетворяющих условию оператора 17. Для окончательного выбора одного из этих подмножеств операторами 18–20 сформулированы дополнительные конкретные требования оптимизации.

Требования оптимизации выражены в минимизации суммарных затрат, связанных с выполнением проверок π_j , входящих в искомое оптимальное подмножество Π^* (оператор 19) или в максимизации достоверности распознавания отказов при выполнении проверок π_j , входящих в искомое оптимальное подмножество Π^* (оператор 20). При запросе минимума суммарных затрат, связанных с выполнением проверок, входящих в искомое подмножество Π^* , оператор 18

передает управление оператору 19, а при необходимости обеспечения максимальной достоверности распознавания отказа – оператору 20.

Оператором 21 в каждом случае осуществляется принятие классифицирующего решения задачи распознавания отказов путем вычисления показателя $\Psi(h, H)$ сходства (меры близости) между вектором (5) и каждым из классов (2) алфавита (3). Применение меры близости $\Psi(h, H)$ в алгоритмах распознавания отказов обусловлено видом ДП, применяемых при поиске места отказа систем, поэтому варианты вычисления показателя сходства $\Psi(h, H)$ при большом числе состояний крайне многообразны. Путем декомпозиции и обобщения рабочих зависимостей, предлагаемых в рассматриваемый участок разработанного алгоритма, арифметические операции оператора 21 сведены к единой схеме расчета среднеквадратического расстояния между компонентами изображения системы (5) и словаря ДП (2).

Решающее правило задачи классификации поиска места отказа системы представлено в операторе 22. Минимизация или максимизация решающего правила оператора 22 определяется конкретизацией видов ДП, задаваемых типом системы с заранее известными конструктивными особенностями (1).

После оптимизации решения задачи поиска места отказа системы, в процесс функционирования разработанного алгоритма включаются операторы 23–29, предназначенные для принятия окончательного заключения по результатам процесса технического диагностирования системы с применением оценки среднего риска принятия решения $R(H_i/h)$, $i = \overline{1, v}$. Операторы 23–29 реализуют байесовскую стратегию принятия решения при техническом диагностировании с ее потребными видоизменениями в зависимости от наличия исходных данных и применяемых критериев выработки окончательного решения. Не нарушая общности рассуждений, отметим потенциал вероятностных методов принятия решений при обработке, в том числе, данных детерминированных и логических ДП, полагая значения таких ДП вероятностными, с вероятностью появления единицы.

Оператор 23 проверяет условия прямой постановки метода Байеса. При дефиниции изображения системы (5) на предыдущих этапах функционирования алгоритма, стабильности описания алфавита классов ТС системы (3), заданных вероятностях классов ТС системы $P(H_i)$, $i = \overline{1, v}$ и вероятностях появления изображений при нахождении системы в i -х классах ТС $P(h/H_i)$, $i = \overline{1, v}$, неизменности платежной матрицы (4), оператором 24 вычисляется средний риск принятия решения технического диагностирования $R(H_i/h)$, $i = \overline{1, v}$ непосредственным применением теоремы Байеса [12; 16].

Величина среднего риска принятия решения технического диагностирования $R(H_i/h)$, $i = \overline{1, v}$ является показателем, по которому принимается итоговое решение о принадлежности распознаваемого состояния системы одному из классов неработоспособных состояний.

В случае отсутствия информации о вероятностях классов ТС системы $P(H_i)$, $i = \overline{1, v}$ управление передается оператору 25, который проверяет условия применимости метода минимакса. При известных алфавите классов ТС системы вида (3) и платежной матрице вида (4) оператор 25 подключает оператор 26, содержащий аппарат метода минимакса. Средний риск принятия решения $R(H_i/h)$, $i = \overline{1, v}$ вычисляется в этом случае по модифицированным правилам указанного метода [6; 15].

Оператор 27 предназначен для включения в процесс принятия решения технического диагностирования инструментов метода Неймана–Пирсона. При наличии исключительно сведений об алфавите классов ТС системы вида (3), средний риск принятия решения $R(H_i/h)$, $i = \overline{1, v}$ вычисляется в операторе 28 по критериям метода Неймана – Пирсона [15].

В противном случае решение о диагнозе не принимается и управление переходит на оператор 29, выполняющий процесс отказа принятия решения технического диагностирования. В целях исключения оператора 29 из структуры оптимального условного алгоритма поиска места отказа систем, предполагается дальнейшее совершенствование диагностических знаний по следующим направлениям:

- обоснование и принятие допущений о пренебрежении потерями, связанными с правильными решениями задачи ТД, несравненно малыми по отношению к потерям, связанным с ошибками I-го и II-го рода;
- оценка плотностей распределения вероятностей для всех классов распознаваемых состояний систем;
- введение в рассмотрение так называемого порогового значения коэффициента правдоподобия, представляющего собой отношение условных плотностей распределения значений ДП в классах неработоспособных состояний систем.

В разрабатываемом алгоритме оператор 29 представляет собой тупиковый тест поиска дефекта. Информация об отсутствии решения, связанного с наиболее вероятным местом отказа системы, передается на оператор 34.

В зависимости от предъявляемых требований, вывод результатов решения задачи ТД предполагает разветвление разрабатываемого алгоритма оператором 30 на линии количественной или качественной оценки результатов контроля.

Структура разработанного алгоритма предполагает также наличие совокупности расположенных в определенной последовательности управляющих и обрабатывающих блоков, обеспечивающих индикацию (регистрацию) результатов контроля в соответствующих единицах измерения j -го ДП или в виде логических условий оценки «Брак».

При задании требований количественного (измерительного) представления результатов распознавания отказов, оценка результатов технического диагностирования выражается оператором 30 в виде числа L_j , показывающего количественное значение j -го ДП и единицы измерения j -го ДП – h_j^0 .

Количественный подход к распознаванию отказов предполагает определение отклонения измеренного значения j -го ДП h_j от номинального h_{j0} в градациях полей допуска и брака. Величина градации в большинстве современных систем контроля выбрана равной 12,5 % от половины допуска [4]. Измеренное значение ДП считается положительным при превышении поля допуска и отрицательным, если измеренное значение ДП меньше поля допуска. Далее оператор 30 включает в работу оператор 31, определяющий оценку брака j -го ДП. В операторе 31 на основе известных предельно допустимых верхнем $h_{jв}$ и нижнем h_{jn} значениях j -го ДП, соответственно, путем выполнения операции округления до ближайшего числа снизу (ent), определяется номер градации K_g , соответствующей значению ДП.

Знак отклонения измеренного значения ДП от номинального значения определяется с использованием очевидной формулы, разрешаемой оператором 32.

При задании требований качественного (допускового) представления результатов поиска места отказа системы, оператор 30 передает управление оператору 33.

При качественном распознавании отказов оценка типа «Брак» (Б), или «Брак выше» (БВ), «Брак ниже» (БН) результатов технического диагностирования осуществляется оператором 33 путем тривиального сравнения измеренного значения j -го ДП h_j с предельно допустимыми верхним $h_{jв}$ и нижним h_{jn} значениями.

Данные количественной или качественной оценки результатов решения задачи ТД подаются на операторы 34 и 35, предназначенные, соответственно, для индикации и документирования диагностической информации.

Выработка рекомендаций по практическому применению решений

Вариант практического применения разработанного алгоритма возможен в структуре информационных диагностических систем, относящихся к типологии систем искусственного интеллекта [4]. Включением алгоритма в состав механизма получения решений (решателя) информационной диагностической системы исключается необходимость оперирования правилами – достаточно объемными конструкциями выражения связей, зависимостей между фактами и их комбинациями. Автоматическое подключение процедур-знаний, позволяющих выполнять вычисления или преобразования функций и принимать решения в определенной ситуации, исполняется алгоритмом в зависимости от данных оператора. Весьма трудоемкий, особенно при большой размерности систем, процесс перебора возможных вариантов при этом ликвидируется. Следовательно, механизм получения решений системы искусственного интеллекта, содержащий полученный алгоритм, предполагается в максимальной оптимизации.

В структуре понятий, формируемых в виде абстрагируемых систем, имеющих определения, структуры и составные элементы, в обязательном порядке предусматриваются исходные данные, указанные выше, что предъявляет существенные требования к объему постоянной памяти и быстродействию процессора вычислителя. Однако этот недостаток менее существенен в сравнении с достоинствами предлагаемого подхода. Более того, ресурсы информационной диагностической системы высвобождаются отсутствием в ее структуре сложных моделей представления базы знаний и задействованных в выводе правил – так называемых продукционных моделей и семантических сетей [4].

Заключение

Полученная совокупность предписаний определяет оптимальную последовательность действий исполнителей и средств, необходимых и достаточных для распознавания отказов с минимальными затратами и (или) максимальной достоверностью контроля ТС систем. Операции распознавания неработоспособных состояний системы определены как многошаговые действия по преобразованию входной информации о ДП, в выходную, представляющую собой заключение о том, к какому классу ТС относится изображение системы.

Таким образом, с применением предлагаемого алгоритма отсутствует необходимость проведения комбинационных и безусловных проверок элементов систем и вместе с тем предопределяется возможность исследования, в первую очередь элементов с низкой надежностью.

Библиографические ссылки

1. Комплексы авиационного вооружения / под ред. В. А. Конуркина. М. : ВВИА им. Н. Е. Жуковского, 2005. 947 с.
2. Эксплуатация комплексов авиационного вооружения / под ред. А. И. Буравлева. М. : ВВИА им. Н. Е. Жуковского, 2006. 287 с.
3. Александровская Л. Н., Афанасьев А. П., Лисов А. А. Современные методы обеспечения безотказности сложных технических систем. М. : Логос, 2001. 206 с.
4. Робототехнические системы подготовки и контроля комплексов авиационного вооружения / под ред. В. Д. Закутаева. М. : ВУНЦ ВВС ВВА им. Н. Е. Жуковского и Ю. А. Гагарина, 2011. 360 с.
5. Системы контроля и метрологическое обеспечение авиационного вооружения / под ред. В. В. Сергушина. М. : ВВИА им. Н. Е. Жуковского, 1992. 372 с.
6. Контроль и управление техническим состоянием комплексов авиационного вооружения / под ред. О. А. Лапсакова. М. : ВВИА им. Н. Е. Жуковского, 1994. 312 с.

7. Морозова Т. Ю., Бекаревич А. А., Будадин О. Н. Новый подход к идентификации дефектов материалов изделий // Контроль. Диагностика. 2014. № 8. С. 42–48.
8. Kastner J., Heinzl C., Plank B. et al. New X-ray computed tomography methods for research and industry // Materials VII Intern. Scientific Conf. on Industrial Computed Tomography. Leuven, Belgium, 2017. P. 1–10.
9. Посадов В. В. (мл.), Посадов В. В., Ремизов А. Е. Алгоритмы диагностики аэродинамических и аэроупругих колебаний компрессора авиационного газотурбинного двигателя // Контроль. Диагностика. 2016. № 3. С. 34–38.
10. Солдатов А. А., Евдокимов Ю. К. Построение многофункциональной автоматизированной системы и алгоритмов контроля и диагностики режимов работы систем учета электроэнергии электросетевых подстанций // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. 2017. № 3. С. 1–10.
11. Асылбеков Н. С., Кыдыралиева Г. Ж., Оморов Т. Т. Идентификация неисправных элементов цифровой системы на основе анализа нейронной сети // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. 2017. № 7. С. 50–53.
12. Дмитриев А. К., Мальцев П. А. Основы теории построения и контроля сложных систем. Л. : Энергоатомиздат, 1988. 192 с.
13. Вунш Г. Теория систем. М. : Советское радио, 1978. 288 с.
14. Директор С., Рорер Р. Введение в теорию систем. М. : Мир, 1974. 464 с.
15. Горелик А. Л., Скрипкин В. А. Методы распознавания. М. : Высшая школа, 1984. 208 с.
16. Корн Г., Корн Т. Справочник по математике для научных работников и инженеров. М. : Наука, 1984. 832 с.

References

1. *Kompleksy aviatsionnogo vooruzheniya* [Aircraft weapon systems]. Ed. by V. A. Konurkin. Moscow, AFIA named after professor N. E. Zhukovsky Publ., 2005, 947 p.
2. *Ekspluatatsiya kompleksov aviatsionnogo vooruzheniya* [Exploitation of aircraft weapons systems]. Ed. by A. I. Buravlev. Moscow, AFIA named after professor N. E. Zhukovsky Publ., 2006, 287 p.
3. Alexandrovskaya L. N., Afanasyev A. P., Lisov A. A. *Sovremennyye metody obespecheniya bezotkaznosti slozhnykh tekhnicheskikh sistem* [Modern methods for ensuring the reliability of complex technical systems]. Moscow, Logos Publ., 2001, 206 p.
4. *Robototekhnicheskiye sistemy podgotovki i kontrolya kompleksov aviatsionnogo vooruzheniya* [Robotic systems for the preparation and control of aircraft weapons systems]. Ed. by V. D. Zakutaev. Moscow, AFMESC AFA named after professor N. E. Zhukovsky and Yu. A. Gagarin Publ., 2011, 360 p.
5. *Sistemy kontrolya i metrologicheskoye obespecheniye aviatsionnogo vooruzheniya* [Control systems and metrological support of aviation weapons]. Ed. by V. V. Sergushin. Moscow, AFIA named after professor N. E. Zhukovsky Publ., 1992, 372 p.
6. *Kontrol' i upravleniye tekhnicheskim sostoyaniyem kompleksov aviatsionnogo vooruzheniya* [Monitoring and control of the technical condition of aircraft weapons systems]. Ed. by O. A. Lapsakov. Moscow, AFIA named after professor N. E. Zhukovsky Publ., 1994, 312 p.
7. Morozova T. Yu., Bekarevich A. A., Budadin O. N. [The new approach to identifying defects in product materials]. *Kontrol'. Diagnostika*. 2014, No. 8, P. 42–48 (In Russ.).
8. Kastner J., Heinzl C., Plank B. et al. [New X-ray computed tomography methods for research and industry]. *Materialy VII Mezhdunar. nauch. konf. po promyshlennoy komp'yuternoy tomografii* [Materials VII Intern. Scientific Conf. on Industrial Computed Tomography]. Leuven, 2017. P. 1–10.

9. Posadov V. V. (jr.), Posadov V. V., Remizov A. E. [Algorithms of aerodynamic and aeroelastic vibrations diagnostics in compressor of gas turbine engine]. *Kontrol'. Diagnostika*. 2016, No. 3, P. 34–38 (In Russ.).
10. Soldatov A. A., Evdokimov Yu. K. [Construction of a multifunctional automated system and control algorithms and diagnostics of the operating modes of electricity metering systems of power grid substations]. *Pribory i sistemy. Upravleniye, kontrol', diagnostika*. 2017, No. 3, P. 1–10 (In Russ.).
11. Asylbekov N. S., Kydyralieva G. Zn., Omorov T. T. [Faulty elements identification of digital system on the basis of the analysis neural network]. *Pribory i sistemy. Upravleniye, kontrol', diagnostika*. 2017, No. 7, P. 50–53 (In Russ.).
12. Dmitriev A. K., Maltsev P. A. *Osnovy teorii postroyeniya i kontrolya slozhnykh sistem* [Fundamentals of the theory of construction and control of complex systems]. Leningrad, Energoatomizdat Publ., 1988, 192 p.
13. Vunsh G. *Teoriya sistem* [System theory]. Moscow, Sovetskoe radio Publ., 1978, 288 p.
14. Director S., Rourer D. *Vvedeniye v teoriyu sistem* [Introduction to systems theory]. Moscow, Mir Publ., 1974, 464 p.
15. Gorelik A. L., Skripkin V. A. *Metody raspoznavaniya* [Recognition methods]. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 1984, 208 p.
16. Korn G., Korn T. *Spravochnik po matematike dlya nauchnykh rabotnikov i inzhenerov* [Mathematical handbook for scientists and engineers]. Moscow, Nauka Publ., 1984, 832 p.

© Подкопаев А. В., Подкопаев И. А., 2021

Подкопаев Александр Владимирович – кандидат технических наук, доцент, профессор кафедры эксплуатации комплексов авиационного вооружения (и прицельных систем); Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия имени профессора Н. Е. Жуковского и Ю. А. Гагарина» (г. Воронеж). E-mail: aleksanpodkopaev@mail.ru.

Подкопаев Илья Александрович – инженер-испытатель; Государственный лётно-испытательный центр имени В. П. Чкалова. E-mail: ilya.podkopaev.96@bk.ru.

Podkopaev Aleksandr Vladimirovich – Cand. Sc., associate professor, professor of the department operation of aircraft weapon systems (and sighting systems); Air Force Military educational and scientific center “Air Force academy named after professor N. E. Zhukovsky and Y. A. Gagarin” (Voronezh). E-mail: aleksanpodkopaev@mail.ru.

Podkopaev Ilya Aleksandrovich – engineer and tester; State flight test center named after V. P. Chkalov. E-mail: ilya.podkopaev.96@bk.ru.
