

Научная статья  
УДК 629.7.071  
DOI: 10.34759/vst-2022-2-158-165

## ПОСТРОЕНИЕ АЛГОРИТМОВ ПОИСКА И УСТРАНЕНИЯ ДЕФЕКТОВ ПАССАЖИРСКИХ ВОЗДУШНЫХ СУДОВ ГРАЖДАНСКОЙ АВИАЦИИ

Аркадий Исаакович Марон<sup>1</sup> ✉, Максим Аркадьевич Марон<sup>2</sup>

<sup>1,2</sup>Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики»,  
Москва, Россия  
<sup>1</sup>amaron@hse.ru ✉  
<sup>2</sup>mmaron@hse.ru

**Аннотация.** Актуальность исследования обусловлена тем, что уменьшение времени поиска и устранения дефектов пассажирских воздушных судов гражданской авиации позволяет существенно уменьшить задержки вылета и связанные с этим потери авиакомпаний. Как показывает статистика, потери растут экспоненциально с увеличением времени, затрачиваемого на ручной поиск и устранение дефекта, являющегося причиной неисправности, зафиксированной бортовыми системами контроля. Цель статьи заключается в том, чтобы предложить практически реализуемый метод построения оптимальных алгоритмов поиска и устранения дефектов с учётом экспоненциальной зависимости потерь от времени поиска и устранения дефекта. Оптимальным считается алгоритм, при котором средние потери, вызываемые задержкой рейса, минимальны. В статье впервые предложен метод построения искомых алгоритмов, основанный на принципе оптимальности Беллмана. Ранее такой подход применялся только при линейной зависимости потерь от времени поиска дефектов. Материалы статьи представляют практическую ценность для руководителей и сотрудников служб эксплуатации пассажирских воздушных судов гражданской авиации.

**Ключевые слова:** пассажирские воздушные суда гражданской авиации, алгоритмы поиска и устранения дефектов, динамическое программирование

**Для цитирования:** Марон А.И., Марон М.А. Построение алгоритмов поиска и устранения дефектов пассажирских воздушных судов гражданской авиации // Вестник Московского авиационного института. 2022. Т. 29. № 2. С. 158-165. DOI: 10.34759/vst-2022-2-158-165

Original article

## ALGORITHMS ELABORATION FOR DEFECTS DETECTION AND ELIMINATION OF CIVIL PASSENGER AIRCRAFT

Arkadii I. Maron<sup>1</sup> ✉, Maksim A. Maron<sup>2</sup>

<sup>1,2</sup>National Research University “Higher School of Economics”,  
Moscow, Russia  
<sup>1</sup>amaron@hse.ru ✉  
<sup>2</sup>mmaron@hse.ru

© Марон А.И., Марон М.А., 2022

## Abstract

This work is up-to-date since cutting time of defects detection and elimination of civil passenger aircraft allows substantial reduction of departure delays and airlines losses associated with them. Statistical data analysis reveals that defects detecting and eliminating are the dominant causes of delays of civil aviation aircraft. The defects detection herewith takes 90% of the time. Modern aircraft is equipped with the onboard diagnostic systems. Their main purpose consists in controlling the aircraft technical state. They report on the presence of malfunction. However, they do not allow for the most part automatically localize the malfunction within the accuracy of the defect, which was its cause. The necessity for manual checking methods application employing specially developed software and hardware means arises. The time of defect detection depends on how well the algorithm for performing checks is selected. This time can be reduced if pre-elaborated searching algorithms are being placed at the technical staff disposal.

A significant effect will be achieved if and only if these algorithms are optimal by the criterion that reflects the real dependence of losses on the delay time. As statistics show, the losses grow exponentially with the increase in time spent on manual detection and elimination of a defect being the cause of a malfunction recorded by the onboard monitoring systems. In as much as the objective function is not additive, classical methods are not applicable for finding the desired algorithm. Heuristic methods do not guarantee the an optimal algorithm elaboration. Its finding by the brute force search is unrealistic, due to the huge number of possible options. The purpose of the article consists in proposing a computationally efficient method for optimal algorithms elaboration for defects detecting and eliminating, considering the exponential dependence of losses on the time of the defect detection and elimination. The algorithm is considered to be optimal if the average losses caused by the flight delay are minimal. The method for elaborating the desired algorithms based on the Bellman optimality principle proposed in this article for the first time. Previously, this approach was used only with a linear dependence of losses on the time for defects searching. Note that each combination of indications of the onboard diagnostic system has its own set of defects, with an accuracy up to which the defect that is the cause of the malfunction is being localized. The number of possible combinations of indications of the onboard diagnostic system is large. Each of them should correspond to its own manual search algorithm. Naturally, the time of its elaboration should not be too long. The proposed method satisfies this requirement. The algorithm elaboration and its presentation to a specialist may well be performed by a modern mobile device, which is not even necessarily to be a full-fledged PC. The materials of this article are of practical value for managers and employees of civil passenger aircraft operation servicing.

**Keywords:** civil passenger aircraft, defects detection and elimination algorithms, dynamic programming

**For citation:** Maron A.I., Maron M.A. Algorithms Elaboration for Defects Detection and Elimination of Civil Passenger Aircraft. *Aerospace MAI Journal*, 2022, vol. 29, no. 2, pp. 158-165. DOI: 10.34759/vst-2022-2-158-165

---

---

## Введение

Анализ статистических данных показывает, что поиск и устранение дефектов являются доминирующими причинами задержек вылета воздушных судов гражданской авиации [1]. При этом 90% процентов времени приходится на поиск дефектов [2]. Задержки вылета воздушных судов приводят к экономическим потерям авиаперевозчика, которые особенно критичны при дефиците воздушных судов [3]. Эти потери можно сократить, если предоставить в распоряжение технического персонала составленные заранее алгоритмы поиска и устранения дефектов [4]. Существенный эффект будет достигаться тогда и

только тогда, когда эти алгоритмы будут оптимальными по критерию, отражающему реальную зависимость потерь от времени задержки.

Современные воздушные суда оснащены бортовыми диагностическими системами – бортовыми системами контроля. Их главной задачей является *контроль исправности*. Они сообщают о наличии неисправности – отклонении хотя бы одного из контролируемых параметров от требований, установленных технической документацией, однако во многих случаях не позволяют автоматически локализовать неисправность с точностью до дефекта, явившегося её причиной.

Возникает необходимость применения ручных методов проведения проверок с использованием специально разработанных аппаратных и программных средств [5–7]. От того, насколько удачно выбран алгоритм выполнения проверок, зависит время поиска дефекта. Наиболее эффективными являются условные алгоритмы, в которых каждая следующая проверка выбирается с учётом результатов предыдущих [8]. Это справедливо как для ручного поиска, так и для автоматического [9, 10]. В условном алгоритме каждому из возможных дефектов соответствует своё определённое время поиска. Качество алгоритма следует оценивать по средним характеристикам. Наиболее представительной целевой функцией является «математическое ожидание (среднее) экономических потерь авиаперевозчика от задержки вылета воздушного судна из-за неисправности» — средние потери (СП). Оптимальным является алгоритм, при котором СП минимальны.

Если экономические потери линейно зависят от времени задержки, то минимальное значение СП будет достигнуто, если удастся построить алгоритм, при котором среднее время поиска дефектов (СВПД) минимально. Для построения такого алгоритма применяют метод динамического программирования или метод ветвей и границ [11]. Если же зависимость между потерями и задержками нелинейна, то алгоритм, при котором СВПД минимально, может и не обеспечивать минимум СП, в силу того что математическое ожидание нелинейной функции случайной величины не равно значению этой функции от математического ожидания случайной величины.

Выполняя поиск и устранение неисправностей воздушных судов гражданской авиации при оперативном техническом обслуживании, необходимо учитывать, что с ростом времени задержки потери авиаперевозчика увеличиваются не линейно [12]. Остановимся на этом вопросе подробнее.

### Этапы и алгоритмы поиска и устранения дефектов воздушных судов

Алгоритм оперативного ручного поиска и устранения дефекта применяют, когда факт наличия дефекта установлен. Как указано в [2], при этом имеется небольшой промежуток времени, когда можно найти дефект и устранить его, не объявляя задержки. Будем называть этот этап первым. Если на первом этапе дефект не устранён, то объявляется задержка рейса и имеется достаточно значительный период времени, за

который можно найти и устранить дефект. Будем называть этот этап вторым. Если и на втором этапе устранить дефект не удаётся, то воздушное судно отправляется в ремонт. Первый и второй этапы являются этапами оперативного поиска и устранения дефектов — оперативного восстановления. На первом этапе «можно выявить и устранить только простейшие дефекты (заменить предохранитель, лампу сигнализации...)» [2]. Основным является этап 2. Рассмотрим проблему построения оптимального алгоритма поиска и устранения дефектов — алгоритма восстановления — применительно к этому этапу. К его началу известными являются показания бортовых диагностических систем и результаты двух-трёх простейших проверок, выполненных на этапе 1. Они локализуют дефект с точностью до определённой подсистемы воздушного судна или, в более общем случае, до определённого подмножества  $E_1 = \{e_i\}$  ( $i=1, 2, \dots, N$ ) множества возможных дефектов  $E_0$ . Каждому дефекту соответствует определённая вероятность  $p_i$  того, что именно он стал причиной выявленной неисправности. Эти условные вероятности можно вычислить, основываясь на показателях безотказности функциональных элементов воздушного судна с учётом срока эксплуатации [13–15]. Искомый алгоритм должен позволять находить и устранять эти дефекты так, чтобы СП были минимальны. Каждой комбинации показаний бортовой системы контроля и результатов проверок, выполненных на первом этапе, соответствуют своё подмножество множества возможных дефектов  $E_0$ , в связи с чем метод построения оптимальных алгоритмов поиска и устранения дефектов — алгоритмов восстановления — должен быть формализуемым и вычислительно не слишком сложным. Стандартной графической формой представления таких алгоритмов является дерево, вершины которого соответствуют проверкам, дуги — их результатам, а листья — дефектам. Однако для удобства восприятия человеком и с учётом возможностей современных мобильных устройств [16] алгоритм может быть представлен в виде записанной на мобильное устройство интерактивной инструкции о порядке выполнения проверок и процедур устранения дефектов.

### Зависимость экономических потерь авиаперевозчика от времени задержки вылета пассажирского воздушного судна

На основании данных, приведенных в [12], можно утверждать, что зависимость экономичес-

ких потерь авиаперевозчика от времени задержки вылета пассажирского воздушного судна аппроксимируется функцией

$$f(t) = \beta e^{\alpha t}, \quad (1)$$

где  $\beta$  и  $\alpha$  – положительные коэффициенты. Эти коэффициенты зависят в первую очередь от установленного Законодателем уровня материальной ответственности авиаперевозчика.

**Критерий оптимальности алгоритма поиска и устранения дефектов**

Каждому из возможных дефектов  $e_i \in E_1$  в конкретном алгоритме, который будем обозначать буквой  $a$ , соответствует своё время  $t_{ai}$ , которое складывается из времени поиска  $t_{ai}^q$  и времени устранения  $t_{ai}^r$  данного дефекта. Будем отождествлять время  $t_{ai}$  с временем задержки воздушного судна при дефекте. Тогда экономические потери перевозчика при дефекте  $e_i$  при условии, что будет выполнен алгоритм  $a$ , будут равны значению функции (1) при  $t = t_{ai}$ . Соответственно, СП при этом алгоритме будут равны

$$F_1(a) = \beta \sum_{i=1}^n p_i e^{\alpha t_{ai}}. \quad (2)$$

Коэффициент  $\beta$  не зависит от алгоритма поиска и устранения дефектов, в силу чего в качестве целевой функцией при решении задачи оптимизации можно принять

$$F(a) = \sum_{i=1}^n p_i e^{\alpha t_{ai}}. \quad (3)$$

Оптимальным является алгоритм  $a_0$ , при котором

$$a_0 \rightarrow \min_{a \in A} F(a) = \min_{a \in A} \sum_{i=1}^n p_i e^{\alpha t_{ai}}, \quad (4)$$

где  $A$  – множество различных алгоритмов поиска и устранения дефектов  $E_1 \subseteq E_0$ .

Ввиду того что целевая функция (3) не является аддитивной, классические методы [11] не применимы для нахождения искомого алгоритма. Эвристические методы [2, 17, 18] не гарантируют построения оптимального алгоритма. Найти его методом полного перебора не реаль-

но, из-за огромного числа возможных алгоритмов. В работе [19] предложен метод построения оптимального алгоритма поиска дефектов при экспоненциальной зависимости потерь от времени поиска. В отличие от данной задачи, рассматривалась ситуация, когда требовалось только локализовать дефект. Вид целевой функции (2) и критерия оптимальности (3) не позволяет оптимизировать алгоритм поиска и устранения дефектов исходя только из времени поиска, даже если время устранения дефекта не зависит от того, какие проверки выполнялись. Именно поэтому мы говорим об алгоритмах поиска и устранения дефектов, а не просто об алгоритмах поиска дефектов. Метод построения алгоритмов поиска и устранения дефектов, оптимальных по критерию вида (3), впервые приводится в данной статье.

**Математическая постановка задачи построения оптимального алгоритма поиска и устранения дефектов**

По показаниям бортовой системы контроля, на основании которых зафиксирован факт наличия неисправности воздушного судна, и результатам проверок, проведенных на первом этапе ручного диагностирования, установлено, что возможными являются дефекты  $E_1 = \{e_i\}$  ( $i=1, 2, \dots, M$ ). Условная вероятность того, что причиной неисправности явился дефект  $e_i$ , равна  $p_i$ . Сумма этих вероятностей равна единице, в силу того что факт наличия неисправности зафиксирован, а  $E_1$  представляет подмножество дефектов, с точностью до которых причина неисправности уже локализована. Допустимыми и информативными являются проверки  $\Pi_1 = \{\pi_j\}$  ( $j = 1, 2, \dots, M$ ). Время проверки  $\pi_j$  равно  $t_j$ . Известен результат каждой допустимой проверки при каждом из возможных дефектов. Время устранения дефекта  $e_i$  равно  $r_i$ .

Требуется построить алгоритм поиска и устранения дефектов  $a_0$ , при котором величина  $F(a_0)$ , определяемая выражением (3), минимальна. При таком алгоритме и СП, определяемые выражением (2), будут минимальными.

**Метод построения оптимального алгоритма поиска и устранения дефектов**

Необходимым условием применения классической схемы динамического программирования является аддитивность целевой функции. Целевая функция (3) аддитивной не является. Одна-

ко можно вывести рекуррентное соотношение для её последовательной минимизации. Это позволяет применить для построения искомого алгоритма вычислительный метод, аналогичный схеме динамического программирования Р. Беллмана. Для этого создадим модель процесса поиска и устранения дефектов. Рассматриваемый процесс состоит из двух фаз: поиск, устранение. Будем характеризовать каждое состояние  $s$  фазы поиска перечнем номеров возможных дефектов. Начальное состояние фазы поиска характеризуется множеством из  $N$  возможных дефектов  $E_1$ . Конечными для фазы поиска являются  $N$  состояний  $s_i$ , когда однозначно определено, что именно дефект  $e_i$  является причиной неисправности воздушного судна. В этих состояниях начинается фаза устранения.

Рассмотрим конечное состояние процесса поиска неисправности  $s_i$ , когда известно, что причиной неисправности является дефект  $e_i$ . Здесь необходимо выполнить устранение дефекта. Поставим в соответствие состоянию  $s_i$  величину

$$F(i) = p_i e^{\alpha r_i}. \quad (5)$$

Назовём её потенциалом состояния  $s_i$ .

Минимальное значение целевой функции  $F(a)$  можно найти с помощью рекуррентного соотношения

$$F(s) = \min_{j \in J} \left[ e^{\alpha t_j} \sum_{r \in R_j} F(s_j^r) \right], \quad (6)$$

где  $J$  – множество номеров проверок, допустимых в состоянии  $s$ ;

$R_j$  – множество возможных результатов проверки с номером  $j$  в состоянии  $s$ ;

$r$  – номер результата проверки  $\pi_j$ ;

$s_j^r$  – состояние, которое возникнет, если выполненная в состоянии  $s$  проверка с номером  $j$  будет иметь результат с номером  $r$ .

Величину  $F(s)$  будем называть минимальным потенциалом состояния  $s$ . В начальном состоянии её значение будет совпадать с искомым минимальным значением величины  $F(a_0)$ .

Процедура построения искомого алгоритма с помощью соотношений (5), (6) такова.

1. Рассчитать потенциалы конечных состояний по формуле (5).

2. Для всех выделяемых состояний  $s$ , начиная с состояний, для которых  $\|S\| = 2$ , и заканчивая

начальным состоянием, определить минимальный потенциал (6) состояния и проверку  $j^*(s)$ , которую надо выполнять, если это состояние возникнет.

3. Проверку, найденную для начального состояния, принять в качестве первой проверки искомого алгоритма. Проверки, найденные для состояний, которые могут возникнуть при её различных результатах, принять в качестве следующих за ней, при соответствующих результатах. Продолжать аналогичный процесс, пока алгоритм не будет полностью построен.

Вычислительная сложность предложенного метода зависит от числа состояний, которые могут возникнуть в процессе выполнения проверки. Методы определения этих состояний для объектов диагноза, представленных таблицами неисправностей [20], основаны на анализе результатов различных комбинаций допустимых проверок [11, 21]. Их реализация может занимать большое количество вычислительных ресурсов. Нахождение выделяемых состояний и расчёты соответствующих им минимальных потенциалов существенно упрощаются, если объект диагноза сконструирован так, что его можно представить логической моделью [20].

### Упрощение диагностики при блочном построении подсистем воздушного судна

Наиболее просто задачи диагностики решаются для тех подсистем воздушного судна, которые можно представить как совокупность функциональных блоков, обменивающихся сигналами. В этом случае соответствие между дефектами и результатами проверок можно представить логической моделью. В ней объект представляет собой правильно пронумерованный граф без циклов. Вершины графа соответствуют блокам системы. Дуги соответствуют путям распространения сигналов. Возможные дефекты отождествлены с блоками модели. Применительно к логической модели можно употреблять термины «дефекты», «блоки», «вершины» как синонимы. Проверка с номером  $j$  ( $j=1, 2, \dots, n$ ), где  $n$  – количество вершин, представляет собой проверку соответствия сигнала на выходе блока  $j$  требованиям, установленным для исправной системы. Она имеет результат «сигнал в норме» (далее – «н») тогда и только тогда, когда блок  $j$  исправен и исправны все блоки, лежащие на путях, ведущих в него из начальных вершин. В противном случае она имеет результат «сигнал не в норме» (далее – «нн»). Здесь и в дальнейшем эти обозна-

чения применяются вместо «0» и «1», чтобы избежать двусмысленности, которая может возникнуть ввиду того, что нулевой и единичный символы имеют разное значение в таблице неисправностей и матрице связности графа логической модели объекта диагноза, а также в силу того, что положительный и отрицательный результаты проверки можно трактовать по-разному.

Построение таблицы неисправностей подсистемы, представленной такой логической моделью, сводится, по существу, к построению матрицы путей графа по заданной матрице смежности его вершин. Построение матрицы путей может быть выполнено методами теории графов и не вызывает серьёзных вычислительных сложностей даже для систем, содержащих тысячи блоков. Упрощается и процедура определения выделяемых состояний. Выделяемому состоянию соответствует только тот подграф, который обладает следующими двумя свойствами:

- 1) имеет лишь одну выходную вершину, которая достижима из любой другой его вершины;
- 2) каждая вершина подграфа, не являющаяся выходной, входит в него вместе со всеми вершинами графа  $G$ , лежащими на пути из неё в выходную вершину данного подграфа.

Если подсистема воздушного судна представлена логической моделью, то рекуррентное соотношение (6) можно записать в упрощённом виде

$$F(s) = \min_{j \in J} \left\{ e^{\alpha t_j} \left[ F(s_{\text{H}}^j) + F(s_{\text{HH}}^j) \right] \right\}, \quad (7)$$

где  $J$  – множество номеров блоков, проверки сигналов на выходах которых являются информативными в состоянии  $s$ ;

$s_{\text{H}}^j, s_{\text{HH}}^j$  – состояния, которые возникнут, если проверка сигнала на выходе блока  $j$  будет иметь результаты «н» и «нн», соответственно.

Вычислительная процедура построения искомого алгоритма на основании (5), (7) аналогична приведенной выше.

### Анализ полученных результатов

Несмотря на то что функция, выражающая зависимость потерь авиакомпании от задержки вылета воздушного судна, и соответствующая ей целевая функция для построения оптимального алгоритма поиска и устранения дефектов не являются аддитивными, удалось вывести рекуррентное соотношение для расчёта минимума целе-

вой функции. На основании этого соотношения предложена процедура построения оптимального алгоритма поиска и устранения дефектов, подобная применяемой при решении оптимизационных задач методом динамического программирования. Это новый результат относительно известных [11, 19]. Число возможных комбинаций показаний бортовой диагностической системы велико. Каждой из них должен соответствовать свой алгоритм ручного поиска. Естественно, время его построения должно быть не слишком велико. Предложенный метод удовлетворяет этому требованию. Построение алгоритма и представление его специалисту вполне может быть осуществлено с помощью современного мобильного устройства, даже не обязательно являющегося полноценной ПЭВМ. Если в качестве диагностической модели воздушного судна удастся использовать логическую модель, то построение искомого алгоритмов ещё более упростится.

### Рекомендации

Наиболее рациональным представляется следующий порядок практического применения полученных результатов.

1. Разрабатывается диагностическая модель воздушного судна. В ней должны быть указаны возможные дефекты, допустимые проверки и результат каждой проверки при каждом возможном дефекте. Датчики, входящие в состав бортовой диагностической системы, рассматриваются как автоматически выполняемые проверки. Модель изначально вводится в ПЭВМ или другое мобильное устройство, используемое специалистом, осуществляющим поиск и устранение дефектов.

2. Зафиксированной комбинации показаний датчиков бортовой диагностической системы, свидетельствующей о неисправности, соответствует вполне определённое подмножество исходного множества возможных дефектов. В случае если используется логическая модель, это определённый подграф исходного графа. Для этого подмножества (подграфа в случае логической модели) по предложенному методу строится алгоритм поиска и устранения дефектов. Он предъявляется специалисту для последовательной реализации. Желательно, чтобы показания датчиков бортовой диагностической системы автоматически вводились в мобильное устройство, но возможен и ручной ввод.

## Выводы

На основании исследования, результаты которого изложены в данной статье, можно сформулировать следующие выводы.

1. Поиск и устранение дефектов являются доминирующими причинами задержек вылета воздушных судов гражданской авиации. Задержки ведут к потерям для авиакомпаний. Проведенный авторами анализ показал, что при увеличении задержки воздушного судна потери авиакомпаний экспоненциально возрастают.

2. Задержки можно существенно сократить, предоставив в распоряжение специалистов автоматически построенные оптимальные алгоритмы поиска и устранения дефектов. В работе впервые предложен эффективный метод построения таких алгоритмов.

3. Материалы статьи представляют практическую ценность для руководителей и сотрудников служб эксплуатации пассажирских воздушных судов гражданской авиации.

## Список источников

1. Соловьёв Ю.А. Анализ непроизводительных потерь при техническом обслуживании и ремонте воздушных судов в авиакомпании «Аэрофлот» // Научный вестник МГТУ ГА. Сер. Эксплуатация воздушного транспорта и ремонт авиационной техники. Безопасность полетов. 2005. № 85. С. 126-129.
2. Макаровский И.М. Основы технической эксплуатации и диагностики авиационной техники: Учеб. пособие. — Самара: Самарский государственный аэрокосмический университет, 2004. — С. 102-115.
3. Немудрый К.В. Исследование проблемы дефицита региональных воздушных судов для гражданской авиации России // Вестник Московского авиационного института. 2013. Т. 20. № 2. С. 16-20.
4. Knotts R. Civil Aircraft Maintenance and Support: Fault Diagnosis from a Business Perspective // Journal of Quality in Maintenance Engineering. 1999. Vol. 5. No. 4, pp. 335-347. DOI: 10.1108/13552519910298091
5. Крылов А.А., Москаев В.А. Методика проведения рентгеноскопического контроля и анализа технического состояния элементов конструкции воздушного судна с сотовым наполнителем // Вестник Московского авиационного института. 2019. Т. 26. № 2. С. 139-146.
6. Засухин А.С. Процедуры поиска и устранения неисправностей с использованием тренажеров «FAROS» технического обслуживания самолётов семейства Airbus // Научный вестник МГТУ ГА. 2014. № 205(7). С. 95-99.
7. Неретин Е.С. Программно-алгоритмическое обеспечение систем испытания бортовых электронных устройств // Вестник Московского авиационного института. 2011. Т. 18. № 3. С. 177-184.
8. Дунаев М.П., Дунаев А.М. Классификация логических алгоритмов технической диагностики // Вестник Инженерной школы Дальневосточного федерального университета. 2014. № 2(19). С. 18-25.
9. Chao C.S., Yang D.L., Liu A.C. An automated fault diagnosis system using hierarchical reasoning and alarm correlation // Journal of Network and Systems Management. 2001. Vol. 9. No. 2, pp. 183-202. DOI: 10.1023/A:1011315125608
10. Zhang S., Song L., Zhang W., Hu Z., Yang Y. Optimal Sequential Diagnostic Strategy Generation Considering Test Placement Cost for Multimode Systems // Sensors. 2015. Vol. 15. No. 10, pp. 25592-25606. DOI: 10.3390/s151025592
11. Пархоменко П.П., Согомонян Е.С. Основы технической диагностики (Оптимизация алгоритмов диагностирования, аппаратные средства). — М.: Энергия, 1981. — С. 84-104.
12. Малышева Т.А. Организационно-методическое обеспечение системы поддержки принятия решений в области регулярности полётов воздушных судов гражданской авиации: Дисс. ... канд. техн. наук. — М.: МГТУ ГА, 2007. — 200 с.
13. Губернаторов К.Н., Киселев М.А., Морошкин Я.В., Чекин А.Ю. Исследование влияния надежности элементов на архитектуру функциональных систем самолета // Вестник Московского авиационного института. 2019. Т. 26. № 1. С. 41-50.
14. Wei X., Yingqing G. Aircraft Engine Sensor Fault Diagnostics Based on Estimation of Engine's Health Degradation // Chinese Journal of Aeronautics. 2009. Vol. 22. No. 1, pp. 18-21. DOI: 10.1016/S1000-9361(08)60064-3
15. Engelhardt G., Macdonald D. Unification of the deterministic and statistical approaches for predicting localized corrosion damage, I. Theoretical foundation // Corrosion science. 2004. Vol. 46. No. 11, pp. 2755-2780. DOI: 10.1016/j.corsci.2004.03.014
16. Максимов Н.А., Солодовникова Д.А., Шаронов А.В. Мобильная система фиксации и учета внешних повреждений воздушных судов при предполетном осмотре // Вестник Московского авиационного института. 2017. Т. 24. № 3. С. 43-50.
17. Машишин О.Ф. Диагностика авиационной техники (информационные основы): Учеб. пособие. — М.: МГТУ ГА, 2007. — 141 с.
18. Гриненко А.В., Нестеров В.В., Лабецкий В.Л. Автоматизированная обучающая система для дистанций сигнализации и связи // Автоматика, связь, информатика. 2001. № 11. С. 22-25.
19. Марон А.И. Метод построения алгоритмов поиска неисправностей в системах железнодорожной автоматики // Надёжность. 2013. № 4. С. 110-113.
20. Карибский В.В., Пархоменко П.П., Согомонян Е.С., Халчев В.Ф. Основы технической диагностики. Кн.1. Модели, объектов, методы и алгоритмы диагноза. — М.: Энергия, 1976. — С. 90-127.

21. Ефанов Д.В. Построение оптимальных алгоритмов поиска неисправностей в технических объектах: Учеб. пособие. — СПб.: ФГБОУ ВПО ПГУПС. 2014. — 49 с.

## References

- Solov'ev Yu.A. *Nauchnyi vestnik MGTU GA. Seriya Eksploatatsiya vozdušnogo transporta i remont aviatsionnoi tekhniki. Bezopasnost' poletov*, 2005, no. 85, pp. 126-129.
- Makarovskii I.M. *Osnovy tekhnicheskoi eksploatatsii i diagnostiki aviatsionnoi tekhniki* (Fundamentals of technical servicing and diagnostics of aviation equipment), Samara, Samarckii gosudarstvennyi aerokosmicheskii universitet, 2004, pp. 102-115.
- Nemoudryi K.V. Research on the problem of regional aircraft shortage in Russian civil aviation. *Aerospace MAI Journal*, 2013, vol. 20, no. 2, pp. 16-20.
- Knotts R. Civil Aircraft Maintenance and Support: Fault Diagnosis from a Business Perspective. *Journal of Quality in Maintenance Engineering*, 1999, vol. 5, no. 4, pp. 335-347. DOI: 10.1108/13552519910298091
- Krylov A.A., Moskaev V.A. A technique for fluoroscopic control and analysis of technical condition of aircraft structural elements with honeycomb filler. *Aerospace MAI Journal*, 2019, vol. 26, no. 2, pp. 139-146.
- Zasukhin A.S. *Nauchnyi vestnik MGTU GA*, 2014, no. 205(7), pp. 95-99.
- Neretin E.S. Software for airborne electronic devices test-system. *Aerospace MAI Journal*, 2011, vol. 18, no. 3, pp. 177-184.
- Dunaev M.P., Dunaev A.M. *Vestnik Inzhenernoi shkoly Dal'nevostochnogo federal'nogo universiteta*, 2014, no. 2(19), pp. 18-25.
- Chao C.S., Yang D.L., Liu A.C. An automated fault diagnosis system using hierarchical reasoning and alarm correlation. *Journal of Network and Systems Management*, 2001, vol. 9, no. 2, pp. 183-202. DOI: 10.1023/A:1011315125608
- Zhang S., Song L., Zhang W., Hu Z., Yang Y. Optimal Sequential Diagnostic Strategy Generation Considering Test Placement Cost for Multimode Systems. *Sensors*, 2015, vol. 15, no. 10, pp. 25592-25606. DOI: 10.3390/s151025592
- Parkhomenko P.P., Sogomonyan E.S. *Osnovy tekhnicheskoi diagnostiki: Optimizatsiya algoritmov diagnostirovaniya, apparaturnye sredstva* (Fundamentals of technical diagnostics: optimization of technical diagnosis algorithms, equipment for technical diagnosis), Moscow, Energiya, 1981, pp. 84-104.
- Malysheva T.A. *Organizatsionno-metodicheskoe obespechenie sistemy podderzhki prinyatiya reshenii v oblasti regulyarnosti poletov vozdushnykh sudov grazhdanskoi aviatsii* (Organizational-and-methodological provision for the decision support system ensuring in the field of flights regularity of civil aviation aircraft), Doctor's thesis, Moscow, MGTU GA, 2007, 200 p.
- Gubernatorov K.N., Kiselev M.A., Moroshkin Y.V., Chekin A.Y. Studying elements reliability impact on the aircraft functional systems architecture. *Aerospace MAI Journal*, 2019, vol. 26, no. 1, pp. 41-50.
- Wei X., Yingqing G. Aircraft Engine Sensor Fault Diagnostics Based on Estimation of Engine's Health Degradation. *Chinese Journal of Aeronautics*, 2009, vol. 22, no. 1, pp. 18-21. DOI: 10.1016/S1000-9361(08)60064-3
- Engelhardt G., Macdonald D. Unification of the deterministic and statistical approaches for predicting localized corrosion damage, I. Theoretical foundation. *Corrosion science*, 2004, vol. 46, no. 11, pp. 2755-2780. DOI: 10.1016/j.corsci.2004.03.014
- Maximov N.A., Solodovnikova D.A., Sharonov A.V. Mobile system for fixing and accounting for aircraft external damages while preflight checkup. *Aerospace MAI Journal*, 2017, vol. 24, no. 3, pp. 43-50.
- Mashoshin O.F. *Diagnostika aviatsionnoi tekhniki: informatsionnye osnovy* (Aircraft diagnostics: information basics), Moscow, MGTU GA, 2007, 141 p.
- Grinenko A.V., Nesterov V.V., Labetskii V.L. *Avtomatika, svyaz', informatika*, 2001, no. 11, pp. 22-25.
- Maron A.I. *Nadezhnost'*, 2013, no. 4, pp. 110-113.
- Karibskii V.V., Parkhomenko P.P., Sogomonyan E.S., Khalchev V.F. *Osnovy tekhnicheskoi diagnostiki. Kn. I. Modeli, ob'ektov, metody i algoritmy diagnoza* (Fundamentals of technical diagnostics. Book 1. Models, objects, methods and algorithms of diagnosis), Moscow, Energiya, 1976, pp. 90-127.
- Efanov D.V. *Postroenie optimal'nykh algoritmov poiska neispravnostei v tekhnicheskikh ob'ektakh* (Elaboration of optimal algorithms for troubleshooting in technical objects), Saint Petersburg, FGBOU VPO PGUPS, 2014, 49 p.

Статья поступила в редакцию 01.04.2022; одобрена после рецензирования 07.04.2022; принята к публикации 14.04.2022.

The article was submitted on 01.04.2022; approved after reviewing on 07.04.2022; accepted for publication on 14.04.2022.