

## Методика и алгоритмы построения оптимальных программ диагностирования технических систем

В.В. Кашковский<sup>1</sup>✉, В.В. Устинов<sup>2</sup>, Л.Г. Чобанян<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск, Российская Федерация

<sup>2</sup>Иркутский филиал Московского государственного технического университета гражданской авиации, г. Иркутск, Российская Федерация

✉victor.kashkovskiy@mail.ru

### Резюме

В работе предложена усовершенствованная методика оптимизации диагностических тестов для поиска отказов в технической системе с глубиной поиска до съемного блока, а также методики поиска отказов непосредственно в блоках с глубиной поиска до элемента. Исходным является метод ведущей функции, который применяется для квадратных матриц «признаки – состояния». В предлагаемом усовершенствованном методе ведущей функции рассматриваются прямоугольные матрицы «признаки – состояния», в которых число признаков заведомо больше числа состояний, что характерно для перехода от экспериментальных и испытательных моделей к серийным образцам. Такие матрицы используются при переходе от экспериментальных образцов к серийному производству авиационной техники. При этом возникает актуальная практическая задача минимизации числа измерительных приборов на борту авиационной техники. Ранее автоматизированное решение подобных задач не рассматривалось. Апробация алгоритмов, представленных в виде дерева и технологических карт поиска отказа, проведена на примере учебно-лабораторного стенда контроля работоспособности противопожарной системы ССП-2А и блока БИ-2АЮ. Предлагаемая методика применима для диагностирования любых технических систем и объектов эксплуатации. Кроме того, предложенные алгоритмы расчета количества требуемых проверок и их заданной последовательности могут быть использованы как для бортовых, так и для наземных автоматизированных систем контроля, что позволит определить минимальное количество установленных датчиков и, следовательно, снизить массово-габаритные характеристики бортовых систем и повысить их надежность.

### Ключевые слова

программы диагностирования, отказы в технической системе, методы контроля и диагностирования, алгоритмы диагностирования, оптимизация диагностических тестов, дерево поиска отказа, технологические карты, метод ведущей функции, квадратные матрицы

### Для цитирования

Кашковский В.В. Методика и алгоритмы построения оптимальных программ диагностирования технических систем / В.В. Кашковский, В.В. Устинов, Л.Г. Чобанян // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2023. № 1 (77). С. 181–193. DOI 10.26731/1813-9108.2023.1(77).181-193.

### Информация о статье

поступила в редакцию: 17.03.2023 г.; поступила после рецензирования: 24.03.2023 г.; принята к публикации: 27.03.2023 г.

## Methodology and algorithms for constructing optimal diagnostic programmes for technical systems

V.V. Kashkovskii<sup>1</sup>✉, V.V. Ustinov<sup>2</sup>, L.G. Chobanyan<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Irkutsk State Transport University, Irkutsk, the Russian Federation

<sup>2</sup>Irkutsk Branch of Moscow State Technical University of Civil Aviation, Irkutsk, the Russian Federation

✉victor.kashkovskiy@mail.ru

### Abstract

The paper proposes an improved technique for optimizing diagnostic tests for finding failures in a technical system with a search depth of up to a removable block, as well as methods for finding failures directly in blocks with a search depth of up to an element. The initial method is the leading function method, which is used for square sign-state matrices. In the proposed improved method of the leading function, rectangular sign-state matrices are considered, in which the number of signs is obviously greater than the number of states, which is typical for the transition from experimental and test models to serial samples. Such matrices are used in the transition from experimental samples to serial production of aviation equipment. In this case, an urgent practical problem arises of minimizing the number of measuring instruments on board the aircraft. Previously, the automated solution of such problems was not considered. Approbation of the algorithms presented in the form of a tree and technological maps of failure search was carried out on the example of a training and laboratory stand for monitoring the performance of the SSP-2A fire-fighting system and the BI-2AYU block. The proposed technique can be used to diagnose any technical systems and objects of

operation. In addition, the proposed algorithms for calculating the number of required checks and their specified sequence can be used for both onboard and ground automated control systems, which will determine the minimum number of installed sensors and, therefore, reduce the weight and size characteristics of onboard systems and improve their reliability.

### Keywords

diagnostic programs, failures in the technical system, control and diagnostic methods, diagnostic algorithms, optimization of diagnostic tests, failure search tree, process maps, leading function method, square matrices

### For citation

Kashkovskii V.V., Ustinov V.V., Chobanyan L.G. Metodika i algoritmy postroeniya optimal'nykh programm diagnostirovaniya tekhnicheskikh sistem [Methodology and algorithms for constructing optimal diagnostic programmes for technical systems]. *Sovremennye tekhnologii. Sistemyi analiz. Modelirovanie* [Modern Technologies. System Analysis. Modeling], 2023, no. 1 (77), pp. 181–193. DOI: 10.26731/1813-9108.2023.1(77).181-193.

### Article info

Received: March 17, 2023; Revised: March 24, 2023; Accepted: March 27, 2023.

### Введение

Главной задачей инженерно-авиационной службы при эксплуатации авиационной техники (АТ) является обеспечение ее постоянной исправности и готовности к работе. Успешное решение этих задач во многом зависит от надежности современной техники. Это определяется большим потоком информации о состоянии исследуемых объектов и ограничением времени, которое отводится для контроля и диагностирования [1–25]. В настоящее время доказано, что до 30 % времени уходит именно на поиск отказа в системе.

Существующие в настоящее время бортовые и наземные автоматизированные системы контроля имеют целый ряд недостатков, одним из которых является ограниченность в распознаваемых отказах систем и устройств и необоснованность выбора программ контроля, т.е. последовательности и количества проверок работоспособности блоков [4, 5, 8].

Разработанное программное обеспечение по реализации алгоритмов оптимизации позволит по имеющимся принципиальным электрическим схемам бортовых систем для любого типа воздушного судна (ВС) в кратчайшие сроки построить технологические карты поиска отказов в виде «дерева». Предложена методика проведения проверки достоверности определяемого отказа, а также разработаны принципы обучения авиационных специалистов методике поиска отказов в среде Multisim [25].

Представленные методики и алгоритмы могут применяться в авиакомпаниях при разработке технологических карт поиска отказов и на этапах проектирования путем минимизации количества информационных датчиков для диагностирования бортовых технических систем.

При разработке программы, которая позволяет менять последовательность операций поиска отказов, необходимо учитывать статистические данные по наиболее ненадежным элементам.

Предлагаемые методики диагностирования состояния АТ могут быть использованы для различных систем и комплексов любых типов ВС [4].

Таким образом, в работе в целом предложена методика и алгоритмы оптимизации диагностических тестов для поиска отказов в технической системе с глубиной поиска до съемного блока, а также методики поиска отказов непосредственно в блоках с глубиной поиска до элемента.

Предложен подход диагностирования технических систем без затрат для установки дополнительного оборудования на находящиеся в эксплуатации объекты (самолеты, поезда, теплоходы и т.д.) путем разработки специальных технологических карт по поиску отказов, установки оптимального количества информационных датчиков для спроектированных объектов эксплуатации или введения предлагаемых в работе алгоритмов оптимального поиска отказов для бортовых автоматизированных систем контроля (БАСК) [4, 5].

### **Актуальность задачи минимизации количества информационных датчиков для диагностирования бортовых систем и предлагаемое решение**

При проектировании предсерийных образцов АТ ее оснащают нештатными системами бортовых устройств регистрации полетных данных (БУР) и испытательными комплексами БАСК. С учетом непредсказуемости процесса

авиационных испытаний данные предсерийные системы оснащены заведомо избыточным (чем при серийном выпуске АТ) количеством датчиков. Это обычная практика авиационных испытаний. При таком подходе при переходе от испытаний к серийному производству АТ возникает актуальная практическая задача минимизации числа измерительных приборов на борту АТ. Актуальность подобной задачи проиллюстрируем рис. 1.

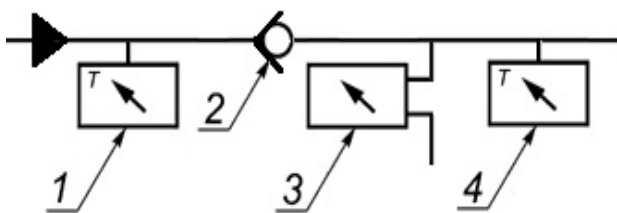


Рис. 1. Участок гидросистемы:

1 – датчик температуры  $D_1$  (до отсечного клапана);  
2 – отсечной клапан; 3 – датчик перепада давлений  $P_1$ ; 4 – датчик температуры  $D_2$  (датчик температуры после отсечного клапана)

Fig. 1. Hydraulic system section:

1 – temperature sensor  $D_1$  (up to the cut-off valve);  
2 – cut-off valve; 3 – differential pressure sensor  $P_1$ ;  
4 – temperature sensor  $D_2$  (temperature sensor after cut-off valve)

В систему, показанную на рис. 1, поступает горячая гидросмесь под давлением и уходит в систему охлаждения.

Данный участок гидросистемы характеризуется следующими техническими состояниями (табл. 1).

Таблица 1. Таблица состояния системы

Table 1. System status table

Обозначение состояния Sign designation	Название состояния State name
$S_1$	Исправное состояние Operative state
$S_2$	Отказ отсечного клапана Cut-off valve failure
$S_3$	Повышенная температура в гидросистеме Elevated temperature in the hydraulic system

По результатам испытаний были получены и исследованы признаки состояний (табл. 2).

Таблица 2. Признаки состояний системы

Table 2. Signs of system states

Признак Sign	Состояние системы State of the system
$x_1$	$\overline{D_1 T} \leq T_{\max \text{ доп}}$
$x_2$	$\overline{D_1 T} > T_{\max \text{ доп}}$
$x_3$	$\overline{D_2 T} \leq T_{\max \text{ доп}}$
$x_4$	$\overline{D_2 T} > T_{\max \text{ доп}}$
$x_5$	$\overline{D_2 T} < T_{\text{норм. экпл.}}$
$x_6$	$P_1 P < P_{\min \text{ доп}}$
$x_7$	$P_1 P \geq P_{\min \text{ доп}}$

Здесь, например,  $x_1$  – максимально допустимая температура гидросмеси, измеренная датчиком  $D_1$ ;  $x_6$  – минимально допустимое давление в гидросистеме, измеренное датчиком  $P_1$  и т.д.

При классической постановке задачи из таблиц состояний и признаков необходимо сформировать квадратную матрицу «признаки – состояния» (табл. 3).

Таблица 3. Классическая таблица

«признаки – состояния»

Table 3. The classic «signs – states» table

Признаки Signs	Состояния States		
	$S_1$	$S_2$	$S_3$
$x_1$	1	1	0
$x_2$	0	0	1
$x_6$	0	1	0

В данном примере все три признака имеют равную информативность, вычисленную через ведущую функцию  $W$  [1, 2]:

$$W_{xi} = n_0 n_1 = 2, \quad i = 1, 3 \text{ и } 6. \quad (1)$$

где  $n_0$  и  $n_1$  – количество нулей и единиц в строке  $x_i$  таблицы «признаки – состояния». Поэтому для упрощения представления новой методики, без проведения пошаговой минимизации, окончательно выберем минимальный набор признаков  $x_1$  и  $x_6$ .

Данный набор датчиков и признаков позволяет однозначно распознавать все три состояния системы. Однако полученное решение нельзя назвать оптимальным, потому что оно не учитывает стоимость датчиков с их установкой и эксплуатацией, количество используемых датчиков, их информативность и т.п.

В качестве решения предлагается использовать расширенную таблицу «признаки – состояния», охватывающую все результаты, полученные при эксплуатации предсерийной или опытной модели (табл. 4).



граммного обеспечения, автоматизирующего минимизацию таблицы «признаки – состояния», что и является целью данной статьи.

### Методика построения оптимального алгоритма поиска отказов на примере учебно-лабораторного стенда по проверке системы пожарной сигнализации ССП-2А

Для примера разработана методика построения алгоритма диагностирования для существующего стенда по проверке противопожарной системы ССП-2А. Задачей ставилась разработка оптимального алгоритма диагностирования построенного в виде дерева поиска отказов и примера технологической карты для ручного метода при отсутствии БАСК на борту любого объекта эксплуатации. В дальнейшем будет проведена проверка работоспособности модели путем установки конкретных наиболее информационных датчиков на данном стенде.

В качестве примера была выбрана структурная схема (рис. 2).

### Построение функционально-логической модели

При построении логического устройства диагностируемой системы каждый конструктивный ее блок представляется логическими блоками, имеющими один выход.

Функционально-логическая модель системы сигнализации пожара состоит из 15 таких блоков (рис. 3) [25].

### Построение таблицы «признаки – состояния»

Для разработки оптимальной программы

диагностирования необходимо построить таблицы истинности, или таблицы «признаки – состояния». Как пример приведена табл. 5, где «1» – возможности определения отказа блока, а «0» – обратное событие. Символами «П1–П15» обозначены проверки конкретных блоков системы. Символом  $S_1$  обозначен отказ первого блока,  $S_2$  – второго и т.д.

На первом шаге определяется количество информации, носимой каждой проверкой методом ведущей функции (1) [1, 2] путем перемножения количества «0» и «1» в каждой строке. Результаты расчетов приведены в последнем столбце табл. 5. Так, для проверки П8 имеется девять единиц и шесть нулей.

### Оптимизация алгоритма поиска отказов

Выбираем как наиболее информативный тест  $P_6 (S_6)$  и перестраиваем две наши подтаблицы так, чтобы в каждой из них слева были состояния, для которых  $P_6$  дает «1», а справа «0». Теперь наша исходная таблица разбита на две подтаблицы (табл. 6).

На следующем шаге ведущая функция  $W$  вычисляется как сумма произведений «1» и «0» в каждой подтаблице по всей строке. Все тесты, кроме выбранных на первом и втором шаге  $P_6(S_6)$ , ранжируются в порядке убывания  $W$ .

Разбиение подтаблиц продолжается до тех пор, пока значения ведущей функции для всех проверок не будет равно «0».

Последовательность проверок, а именно программа поиска отказов, представлена в виде дерева поиска отказов (рис. 4).

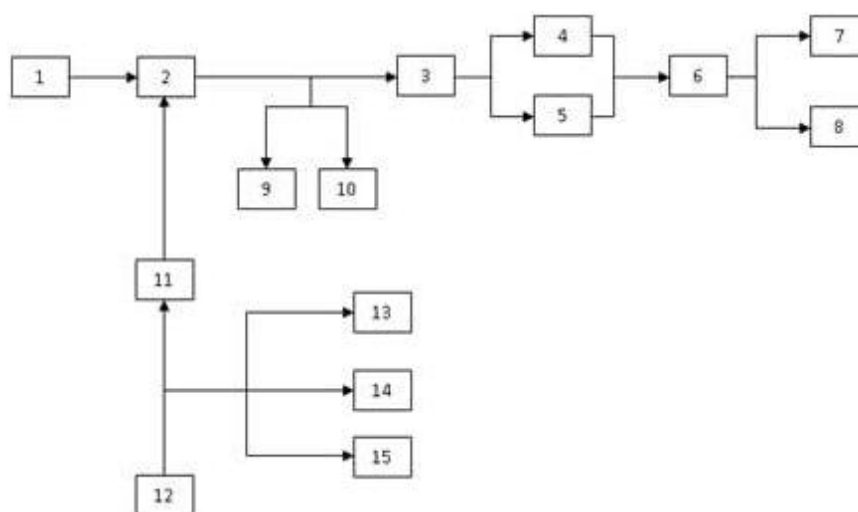


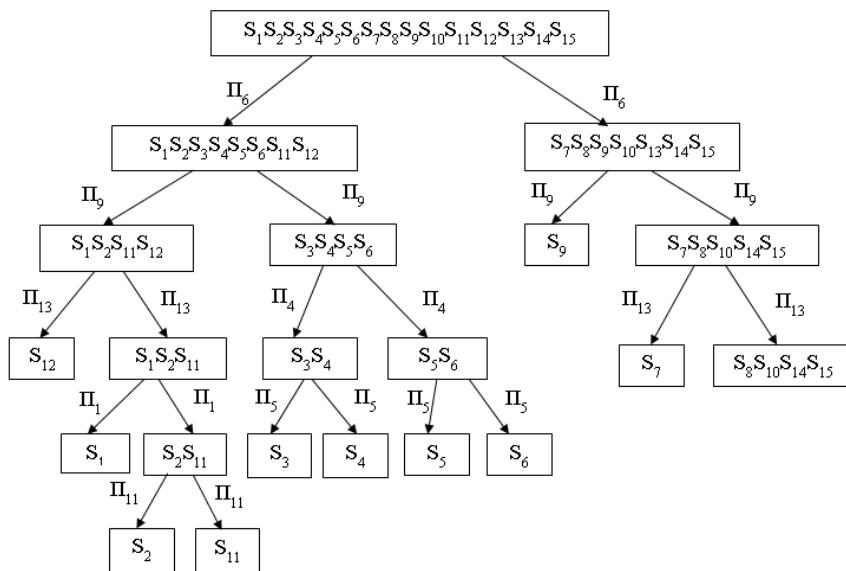
Рис. 3. Функционально-логическая модель системы сигнализации пожара  
Fig. 3. Functional logical model of the system fire alarm

**Таблица 5.** Таблица вычислений значений ведущей функции по проверкам  
**Table 5.** Table of calculations of the values of the master function by checks

№	S <sub>1</sub>	S <sub>2</sub>	S <sub>3</sub>	S <sub>4</sub>	S <sub>5</sub>	S <sub>6</sub>	S <sub>7</sub>	S <sub>8</sub>	S <sub>9</sub>	S <sub>10</sub>	S <sub>11</sub>	S <sub>12</sub>	S <sub>13</sub>	S <sub>14</sub>	S <sub>15</sub>	W
П <sub>1</sub>	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	14
П <sub>2</sub>	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	44
П <sub>3</sub>	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	50
П <sub>4</sub>	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	54
П <sub>5</sub>	1	1	1	0	1	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	54
П <sub>6</sub>	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	1	1	0	0	0	56
П <sub>7</sub>	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	1	1	0	0	0	54
П <sub>8</sub>	1	1	1	1	1	1	0	1	0	0	1	1	0	0	0	54
П <sub>9</sub>	1	1	0	0	0	0	0	0	1	0	1	1	0	0	0	50
П <sub>10</sub>	1	1	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	0	0	0	50
П <sub>11</sub>	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	36
П <sub>12</sub>	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	14
П <sub>13</sub>	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	26
П <sub>14</sub>	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	26
П <sub>15</sub>	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1	26

**Таблица 6.** Таблица вычислений значений ведущей функции на первом шаге минимизации  
**Table 6.** Table of calculations of the values of the leading function at the first minimization step

№	S <sub>1</sub>	S <sub>2</sub>	S <sub>3</sub>	S <sub>4</sub>	S <sub>5</sub>	S <sub>6</sub>	S <sub>11</sub>	S <sub>12</sub>	S <sub>7</sub>	S <sub>8</sub>	S <sub>9</sub>	S <sub>10</sub>	S <sub>13</sub>	S <sub>14</sub>	S <sub>15</sub>	W
П <sub>6</sub>	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0
П <sub>1</sub>	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	7
П <sub>2</sub>	1	1	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	16
П <sub>3</sub>	1	1	1	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	15
П <sub>4</sub>	1	1	1	1	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	12
П <sub>5</sub>	1	1	1	0	1	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	12
П <sub>7</sub>	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	6
П <sub>8</sub>	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1	0	0	0	0	0	6
П <sub>9</sub>	1	1	0	0	0	0	1	1	0	0	1	0	0	0	0	22
П <sub>10</sub>	1	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	1	0	0	0	22
П <sub>11</sub>	1	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	15
П <sub>12</sub>	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	7
П <sub>13</sub>	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1	0	0	13
П <sub>14</sub>	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1	0	13
П <sub>15</sub>	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1	13



**Рис. 4.** Дерево поиска отказов  
**Fig. 4.** Failure search tree

В работе также предусмотрено исключение визуально наблюдаемых отказов при проведении диагностирования или наиболее ненадежных блоков. Например, если не работает светосигнализатор  $S_7$ , то однозначно в первую очередь необходимо проконтролировать его работоспособность, а не делать весь комплекс проверок.

В этом случае алгоритм оптимизации будет определяться следующим деревом поиска отказов или алгоритм поиска примет вид, как на рис. 5.

**Проверка результатов**

Результаты, полученные методом ведущей функции, целесообразно проверить информативным методом.

Для упрощения алгоритмов вычисления выбираем из табл. 5 наиболее информативные проверки. Такими проверками являются  $\Pi_3$ ,  $\Pi_6$ ,  $\Pi_7$ . Проведем расчет количества информативно несущей последовательности для каждой проверки по формуле [1, 2]:

$$I_{\Pi_6} = \frac{8}{15} \log_2 \frac{8}{15} + \frac{7}{15} \log_2 \frac{7}{15} = 0,48 + 0,52 = 1;$$

$$I_{\Pi_7} = \frac{9}{15} \log_2 \frac{9}{15} + \frac{6}{15} \log_2 \frac{6}{15} = 0,44 + 0,53 = 0,97;$$

$$I_{\Pi_3} = \frac{5}{15} \log_2 \frac{5}{15} + \frac{10}{15} \log_2 \frac{10}{15} = 0,52 + 0,36 = 0,88.$$

На следующем шаге проводим расчет количества информативно несущей последовательности двух самых информативных проверок  $\Pi_{6,2}$ ,  $\Pi_{6,5}$ ,  $\Pi_{6,9}$ .

На основании выбора двойной проверки строим последовательность для трех самых информативных проверок  $\Pi_{6,9,4}$ ,  $\Pi_{6,9,8}$ ,  $\Pi_{6,9,13}$ .

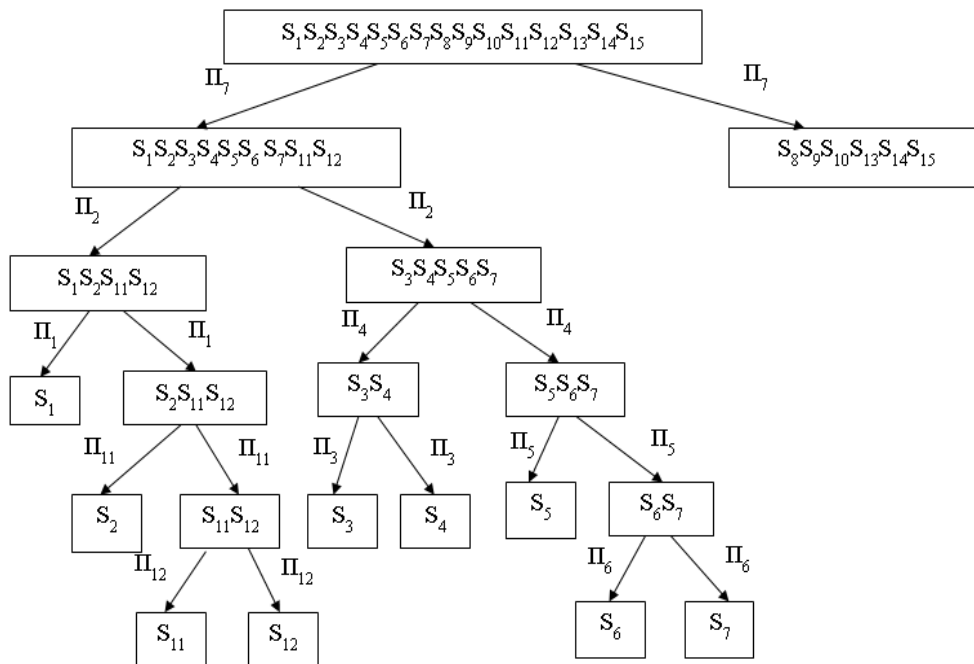
Сравнительный анализ результатов вычислений методом ведущей функции и информативным методом показал идентичность результатов вычислений, что позволяет сделать вывод о верности диагностирования построенных оптимальных программ.

Для обучения методике поиска отказов в дискретных комбинационных устройствах разработана оригинальная программа Logika-2.

**Разработка технологической карты поиска отказа**

В случаях, если на борту объекта эксплуатации не предусмотрена установка БАСК или отсутствуют программные модули диагностирования отдельных систем, возможно, как один из вариантов, применение технологических карт поиска отказа. Упрощенный пример технологической карты приведен на рис. 6.

Разработанные усовершенствованные методики построения оптимальных программ диагностирования можно также использовать для эксплуатируемых объектов по имеющимся



**Рис. 5.** Дерево поиска отказов при неработающем светосигнализаторе  
**Fig. 5.** Failure search tree Failure search tree under non-working light signaling device

функциональным схемам для конкретных бортовых систем.

Таким образом, в работе предложен один из подходов диагностирования бортовых систем без дополнительных затрат на установку оборудования на находящиеся в эксплуатации ВС путем разработки специальных технологических карт по поиску отказов, или установки на борт ВС оптимального количества информационных датчиков, или введения предлагаемых в работе алгоритмов оптимального поиска отказов для бортовых систем контроля.

### Методика поиска отказа элемента в блоке БИ-2АЮ

В настоящее время существует множество алгоритмов поиска неисправностей, которые подходят для современных бортовых автоматизированных систем контроля и диагностики.

Разработанный алгоритм поиска неисправностей также может быть использован для организации процесса диагностирования отдельных узлов на этапах проектирования испытаний и оптимизации количества датчиков рас-

познавания неисправностей. Это способствует снижению массогабаритных характеристик и стоимости проекта, повышает надежность бортовой системы управления.

Для того чтобы упростить анализ схемы, рекомендуется использовать стенд заземления системы с установленными необходимыми датчиками и счетчиками. После внесения в стенд соответствующих ошибок проводятся необходимые измерения для заполнения таблицы «признаки – состояния».

С этой целью предлагается разработать автономный блок в виде устройства, состоящего из платы, на которой расположены цифро-аналоговый и аналого-цифровой преобразователи. Для визуального представления результатов поиска неисправности и работы с прибором разработана программа сопряжения прибора с ноутбуком (рис. 7).

Для исследования системы была выбрана противопожарная система ССП-2А по причине того, что она является достаточно значимой с точки зрения безопасности полетов (см. рис. 2).

Такие алгоритмы разрабатываются в виде

Технологическая карта №1 Отказ противопожарной системы (признаки отказа: одновременно не горят два светосигнализатора $S_2, S_{10}$ , на этапе тестового контроля)		
Содержание операции и технические требования	Признаки работоспособности	Примечания
1. В соответствии с деревом поиска отказов провести контроль работоспособности светосигнализатор $S_2$	а) В случае отказа сигнализатора – заменить б) В случае его работоспособности перейти к проверке сигнализатора $S_{10}$	
2. В соответствии с деревом поиска отказов перевести контроль работоспособности светосигнализатора $S_{11}$	а) В случае отказа сигнализатора – заменить б) В случае его работоспособности перейти к проверке работоспособности блока $S_{10}$ (пульт ПП-ССП)	
3. В соответствии с деревом поиска провести контроль работоспособности $S_2$	а) В случае отказа блока $S_1$ (пульт ПП-ССП) заменить б) В случае его работоспособности перейти к проверке $S_{10}$ (блок БИ-2АЮ)	Провести замер выходных сигналов согласно по принципиальной схеме
4. В соответствии с деревом поиска провести контроль работоспособности $S$	а) В случае отказа блока $S_{10}$ (блок БИ-2АЮ) - заменить б) В случае его работоспособности перейти к проверке $S_{10}$ (панель датчиков температуры)	Провести замер выходных сигналов принципиальной схеме
5. В соответствии с деревом поиска провести контроль работоспособности $S$	а) В случае отказа блока $S_1$ – заменить б) В случае его работоспособности изменить $S_1$ (переключатель)	Провести замер выходных сигналов согласно принципиальной схеме

Рис. 6. Технологическая карта поиска отказа

Fig. 6. Process flow chart for failure search



функционально-логической модели, дерева и блок-схем поиска неисправностей для выполнения оптимального количества операций по поиску неисправностей в системе [25].

Данный алгоритм позволит определять неисправности с глубиной поиска до съемных блоков, что недостаточно с учетом существующих трудностей получения новых блоков. Ремонт самого блока намного эффективнее. Необходимо разработать устройство для диагностирования отдельных блоков с глубиной поиска неисправностей вплоть до элемента. Это снижает трудозатраты на поиск неисправностей и повышает надежность управления.

Выполненные исследования показывают, что блок БИ-2АЮ является одним из наиболее значимых блоков, его неисправное состояние приводит к выходу из строя всей системы. Из анализа надежности элементов противопожарной системы ССП-2А следует, что он является наиболее ненадежным блоком.

Для осуществления работы алгоритма поиска неисправностей на ранних этапах была разработана блок-схема интерфейсного устройства диагностики блока БИ-2АЮ (рис. 7). Оператор управляет программой, которая установлена на персональный компьютер. Далее идет программное управление микроконтроллером. Микроконтроллер посылает тестовые сигналы на блок БИ-2АЮ через устройства связи и

управления. Выходной сигнал с блока через делитель напряжения, преобразующий напряжение 27 В в напряжение 5 В. Микроконтроллер отправляет выходные сигналы в виде кода на персональный компьютер для дальнейшего анализа результатов диагностики.

С помощью персонального компьютера в программе, разработанной в среде программирования Borland Builder C++ 6.0, осуществляется управление микроконтроллером.

Для проверки блока путем проведения испытаний выполнена таблица истинности по исправному состоянию и признакам отказавших элементов вплоть до обрывов в штепсельных разъемах. Примеры признаков отказов приведены в табл. 7 [25].

Для данного интерфейса принцип построения программы заключается в следующем: программа при своей загрузке подключает библиотеку mpusbapi.dll.

При подключении блока БИ-2АЮ через устройство сопряжения к ПЭВМ принцип диагностирования заключается в работе с программой, разработанной на языке программирования СИ<sup>++</sup>.

При возникновении неисправности появляется код отличный от исправного состояния, например, который показан на рис. 8. При этом по таблице истинности распознается вид отказа.

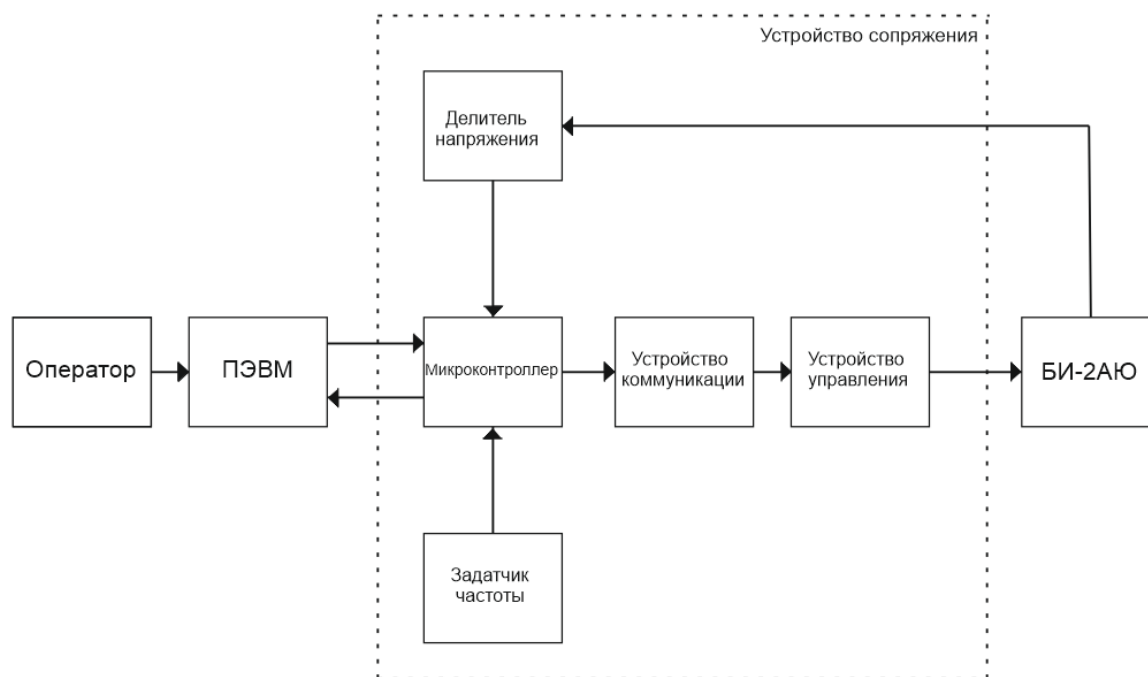
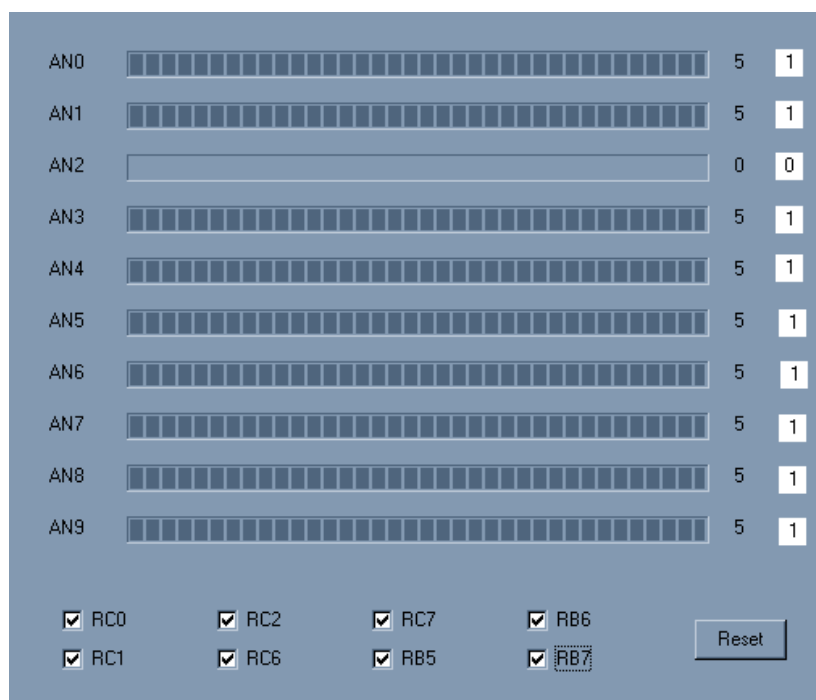


Рис. 7. Структурная схема устройства сопряжения  
Fig. 7. Interface device schematic diagram

Таблица 7. Пример признаков отказов  
 Table 7. Example of failure signs

Код отказа Failure code	Характеристика отказа Failure characteristic	Место отказа Failure location
111111111	Устройство исправно Device OK	–
011111111	Обрыв, окисление, коррозия Breakage, oxidation, corrosion	Ш2 pin1
101111111	Обрыв, окисление, коррозия Breakage, oxidation, corrosion	Ш2 pin2
110111111	Обрыв, окисление, коррозия Breakage, oxidation, corrosion	Ш2 pin3
111011111	Обрыв, окисление, коррозия Breakage, oxidation, corrosion	Ш2 pin4
111101111	Обрыв, окисление, коррозия Breakage, oxidation, corrosion	Ш2 pin5
111110111	Обрыв, окисление, коррозия Breakage, oxidation, corrosion	Ш2 pin6
111111011	Обрыв, окисление, коррозия Breakage, oxidation, corrosion	Ш2 pin7
111111101	Обрыв, окисление, коррозия Breakage, oxidation, corrosion	Ш4 pin1
111111110	Обрыв, окисление, коррозия Breakage, oxidation, corrosion	Ш4 pin2
111111110	Обрыв, окисление, коррозия Breakage, oxidation, corrosion	Ш4 pin3
001111111	Обрыв, окисление, коррозия Breakage, oxidation, corrosion	Ш4 pin4
100111111	Неисправность элемента Element malfunction	R1
110011111	Неисправность элемента Element malfunction	R2
111001111	Неисправность элемента Element malfunction	R3
111100111	Неисправность элемента Element malfunction	R4
111110011	Неисправность элемента Element malfunction	R5
111111001	Неисправность элемента Element malfunction	R6
000111111	Неисправность элемента Element malfunction	P1



**Рис. 8.** Возникновение отказа при коде отличном от исправного состояния  
**Fig. 8.** Failure occurring at a code other than serviceable condition

### Заключение

В статье предложена методика и алгоритмы оптимизации диагностических тестов для поиска отказов в технической системе с глубокой поиска до съемного блока, а также методика поиска отказов непосредственно в блоках с глубиной поиска до элемента. Предлагаемая методика апробирована на конкретной системе ССП-2А и отдельном блоке этой системы БИ-2АЮ и может быть использована для различных систем и комплексов любых типов ВС.

В работе предусмотрено исключение визуально наблюдаемых отказов при диагностировании наиболее ненадежных блоков и трудоемкости по их проверке с учетом доступности на борту ВС.

Предложен один из подходов диагностирования технических систем без затрат для установки дополнительного оборудования на находящиеся в эксплуатации объекты (самолеты, поезда, теплоходы и т.д.) посредством разработки специальных технологических карт по

поиску отказов, установки оптимального количества информационных датчиков для спроектированных объектов эксплуатации или введения предлагаемых в работе алгоритмов оптимального поиска отказов для БАСК.

Сравнительный анализ результативных вычислений методом усовершенствованной ведущей функции и информативным методом [2] показал, что результаты вычислений идентичны. Это позволяет сделать вывод, что построенные оптимальные программы диагностированы верно.

Предложенные методика и устройство позволят значительно снизить затраты на приобретение и использование дорогостоящего оборудования, снизить трудозатраты на поиск отказов, проводить с достаточной достоверностью диагностику отдельных блоков, что может быть применено для любых блоков авиационного оборудования.

### Список литературы

1. Инженерно-авиационная служба и эксплуатация авиационного оборудования / А.Е. Акиндеев, В.Д. Константинов, С.В. Крауз и др. М. : ВВИА им. проф. Н.Е. Жуковского, 1970. 513 с.
2. Румянцев Е.А., Осовский В.П., Протопопов В.А. Инженерно-авиационное обеспечение боевых действий частей авиации вооруженных сил и эксплуатация авиационного оборудования. М. : ВВИА им. проф. Н.Е. Жуковского, 1989. 397 с.
3. Диагностирование и прогнозирование технического состояния авиационного оборудования / В.Г. Воробьев, В.В. Глухов, Ю.В. Козлов и др. М. : Транспорт. 1984. 191 с.

4. Воробьев В.Г. Техническая эксплуатация авиационного оборудования / В.Г. Воробьев, В.Д. Константинов, В.Г. Денисов и др. М. : Транспорт, 1990. 296 с.
5. Авиационные цифровые системы контроля и управления / О.А. Артюховский, С.Н. Беляшевский, Ю.И. Валов и др. Л. : Машиностроение. Ленинградское отделение, 1976. 608 с.
6. Барзилович Е.Ю. Савенков М.В. Статистические методы оценки состояния авиационной техники. М. : Транспорт, 1987. 240 с.
7. Гуляев В.А., Чаплыга В.М., Кедровский И.В. Методы и средства обработки диагностической информации в реальном времени. Киев : Наукова думка, 1986. 219 с.
8. Диагностические комплексы систем автоматического самолетовождения / В.А. Игнатов, С.М. Паук, Г.Ф. Коначович и др. М. : Транспорт, 1975. 272 с.
9. Дмитренко И.Е. Техническая диагностика и автоконтроль систем железнодорожной автоматики и телемеханики. М. : Транспорт, 1986. 141 с.
10. Пархоменко П.П., Согомоян Е.С. Основы технической диагностики (Оптимизация алгоритмов диагностирования, аппаратные средства). М. : Энергоиздат, 1981. 319 с.
11. Техническая эксплуатация летательных аппаратов / Н.Н. Смирнов, Н.И. Владимиров, Ж.С. Черненко и др. М. : Транспорт, 1990. 423 с.
12. Техническая эксплуатация летательных аппаратов / А.И. Пугачев, М.Л. Бураков, Н.Т. Домотенко и др. М. : Транспорт, 1969. 480 с.
13. Тоценко В.Г. Алгоритмы технического диагностирования дискретных устройств. М. : Радио и связь, 1985. 238 с.
14. Allan F.J., Kameda T., Toida S. An Approach to the Diagnosability Analysis of a System // IEEE Transactions on Computers. 1975. Vol. C-24, Is. 10. P. 1040–1042.
15. Barsi F., Grandoni F., Maestrini P. A Theory of diagnosability of digital systems // IEEE Transactions on Computers. 1976, Vol. C-25, Is. 6. P. 585–593.
16. Fujiwara H., Kinoshita K. Connections assignments for probabilistically diagnosable systems // IEEE Transactions on Computers. 1978. Vol. C-27, Is. 3. P. 280–283.
17. Fujiwara H., Kinoshita K. Some existence theorems for probabilistically diagnosable systems // IEEE Transactions on Computers. 1978. Vol. C-27, Is. 4. P. 379–384.
18. Kime C.R. An Abstract model for digital system diagnosis // IEEE Transactions on Computers. 1979. Vol. C-28, Is. 10. P. 754–767.
19. Mallela S., Masson G.M. Diagnosis without repair for hybrid fault situations // IEEE Transactions on Computers. 1980. C-29, Is. 6. P. 461–470.
20. Mallela S., Masson G.M. Diagnosable systems for intermittent faults // IEEE Transactions on Computers. 1978. C-27, Is. 6. P. 560–566.
21. Preparata F.P., Metzger G., Chien R.T. On the connection assignment problem of diagnosable systems // IEEE Transactions on Electronic Computers. 1967. Vol. EC-16, Is. 6. P. 848–854.
22. Russel J.D., Kime C.R. System Fault Diagnosis: Closure and Diagnosability with Repair // IEEE Transactions on Computers. 1975. Vol. C-24, Is. 11. P. 1078–1089.
23. Тихий И.И., Кашковский В.В. Испытания и эксплуатация авиационной техники. Ч. 1. Иркутск : ИВВАИУ, 2009. 308 с.
24. Устинов В.В., Журавлева В.Б. Разработка методики, алгоритма и программы диагностирования бортового оборудования летательных аппаратов на этапах проектирования и испытаний // Актуальные проблемы развития авиационной техники и методов ее эксплуатации : сб. тр. V науч.-практ. конф. студентов и аспирантов. Иркутск, 2012. С. 46–51.
25. Устинов В.В., Кузаков О.Л. Методика диагностирования отдельных блоков авиационного оборудования с глубиной поиска отказа до элемента // Актуальные вопросы исследований в авионике: теория, обслуживание, разработки : сб. тезисов докл. II Всерос. науч.-практ. конф. «Авиатор». Воронеж, 2015. С. 280–282.

### References

1. Akindeev A.E., Konstantinov V.D., Krauz S.V., Rummyantsev E.A., Sergeev N.P., Sindeev I.M. Inzhenerno-aviatsionnaya sluzhba i ekspluatatsiya aviatsionnogo oborudovaniya [Aviation Engineering Service and Operation of Aviation Equipment]. Moscow: VVIA im. prof. N.E. Zhukovskii Publ., 1970. 513 p.
2. Rummyantsev E.A., Osovskii V.P., Protopopov V.A. Inzhenerno-aviatsionnoe obespechenie boevykh deistvii chastei aviatsii vooruzhennykh sil i ekspluatatsiya aviatsionnogo oborudovaniya [Engineering and aviation support of combat operations of aviation units of the armed forces and operation of aviation equipment]. Moscow: VVIA im. prof. N.E. Zhukovskii Publ., 1989. 397 p.
3. Vorob'ev V.G., Glukhov V.V., Kozlov Yu.V., Konstantinov V.D., Sindeev I.M. Diagnostirovanie i prognozirovaniye tekhnicheskogo sostoyaniya aviatsionnogo oborudovaniya [Diagnostics and forecasting of the technical condition of aviation equipment]. Moscow: Transport Publ., 1984. 191 p.
4. Vorob'ev, V.G., Konstantinov V.D., Denisov V.G., Kulikov G.A., Pal'chikh M.I. Tekhnicheskaya ekspluatatsiya aviatsionnogo oborudovaniya [Technical operation of aviation equipment] M.: Transport, 1990. 296 p.
5. Artyukhovskii O.A., Belyashevskii S.N., Valov Yu.I., Grigor'ev N.I., Gal'perin M.I., Myasnikov V.A., Petrov V.P., Semenov N.M., Byushgens G.S., Sinilina O.V., Makhovikova G.A., Chistyakov S.F. Aviatsionnye tsifrovye sistemy kontrolya i upravleniya [Aviation digital control and management systems]. Leningrad: Mashinostroenie. Leningradskoe otdelenie Publ., 1976. 608 p.
6. Barzilovich E.Yu. Savenkov M.V. Statisticheskie metody otsenki sostoyaniya aviatsionnoi tekhniki [Statistical methods for assessing the state of aviation technology.] Moscow: Transport Publ., 1987. 240 p.
7. Gulyaev V.A., Chaplyga V. M., Kedrovskii I.V. Metody i sredstva obrabotki diagnosticheskoi informatsii v real'nom vremeni [Methods and means of processing diagnostic information in real time]. Kyiv: Naukova Dumka Publ., 1986. 219 p.

8. Ignatov V.A., Pauk S.M., Konakhovich G.F., Efimov A.A., Konstantinovskii V.V., Chuprin V.M., Vlasov B.B. Diagnosticheskie komplekсы sistem avtomaticheskogo samoletovozhdeniya [Diagnostic complexes of automatic aircraft navigation systems]. Moscow: Transport Publ., 1975. 272 p.
9. Dmitrenko I.E. Tekhnicheskaya diagnostika i avtokontrol' sistem zhelezнодороzhnoi avtomatiki i telemekhaniki [Technical diagnostics and automatic control of railway automation and remote control systems]. Moscow: Transport Publ., 1986. 141 p.
10. Parkhomenko P.P., Sogomonyan E.S. Osnovy tekhnicheskoi diagnostiki (Optimizatsiya algoritmov diagnostirovaniya; apparaturnye sredstva) [Fundamentals of technical diagnostics: (Optimization of diagnostic algorithms; hardware)]. Moscow: Energoizdat Publ., 1981. 319 p.
11. Smirnov N.N., Vladimirov N.I., Chernenko Zh.S., Komarov A.A., Pugachev A.I., Chinyuchin Yu.M. Tekhnicheskaya ekspluatatsiya letatel'nykh apparatov [Technical operation of aircraft]. Moscow: Transport Publ., 1990. 423 p.
12. Pugachev A.I., Burakov M.L., Domotenko N.T., Kravets A.S., Kurganovich V.G., Polyanichenko A.A., Smirnov N.N. Tekhnicheskaya ekspluatatsiya letatel'nykh apparatov [Technical operation of aircraft]. Moscow: Transport Publ., 1969. 480 p.
13. Totsenko V. G. Algoritmy tekhnicheskogo diagnostirovaniya diskretnykh ustroystv [Algorithms for technical diagnostics of discrete devices]. Moscow: Radio i svyaz' Publ., 1985. 238 p.
14. Allan F.J., Kameda T., Toida S. An Approach to the Diagnosability Analysis of a System. *IEEE Transactions on Computers*, 1975, vol. C-24, issue 10, pp. 1040–1042.
15. Barsi F., Grandoni F., Maestrini P. A Theory of diagnosability of digital systems. *IEEE Transactions on Computers*, 1976, vol. C-25, issue 6, pp. 585–593.
16. Fujiwara H., Kinoshita K. Connections assignments for probabilistically diagnosable systems. *IEEE Transactions on Computers*, 1978, vol. C-27, issue 3, pp. 280–283.
17. Fujiwara H., Kinoshita K. Some existence theorems for probabilistically diagnosable systems. *IEEE Transactions on Computers*, 1978, vol. C-27, issue 4, pp. 379–384.
18. Kime C.R. An Abstract model for digital system diagnosis. *IEEE Transactions on Computers*, 1979, vol. C-28, issue 10, pp. 754–767.
19. Mallela S., Masson G.M. Diagnosis without repair for hybrid fault situations. *IEEE Transactions on Computers*, 1980, vol. C-29, issue 6, pp. 461–470.
20. Mallela S., Masson G.M. Diagnosable systems for intermitten faults. *IEEE Transactions on Computers*, 1978, vol. C-27, issue 6, pp. 560–566.
21. Preparata F.P., Metze G., Chien R.T. On the connection assignment problem of diagnosable systems. *IEEE Transactions on Electronic Computers*, 1967, vol. EC-16, issue 6, pp. 848–854.
22. Russel J.D., Kime C.R. System Fault Diagnosis: Closure and Diagnosability with Repair. *IEEE Transactions on Computers*, 1975, vol. C-24, issue 11, pp. 1078–1089.
23. Tikhii I.I., Kashkovskii V.V. Ispytaniya i ekspluatatsiya aviatsionnoi tekhniki. Chast' 1 [Testing and operation of aviation equipment. Part 1]. Irkutsk: IVVAIU Publ., 2009. 308 p.
24. Ustinov V.V., Zhuravleva V.B. Razrabotka metodiki, algoritma i programmy diagnostirovaniya bortovogo oborudovaniya letatel'nykh apparatov na etapakh proyektirovaniya i ispytaniy [Development of a methodology, algorithm and program for diagnosing on-board equipment of aircraft at the stages of design and testing.]. *Sbornik trudov V Nauchno-prakticheskoi konferentsii studentov i aspirantov «Aktual'nye problemy razvitiya aviatsionnoi tekhniki i metodov ee ekspluatatsii»* [Proceedings of the V Scientific and Practical Conference of students and Ph.D. students «Actual problems of the development of aviation technology and methods of its operation»]. Irkutsk, 2012, pp. 46–51.
25. Ustinov V.V., Kuzakov O.L. Metodika diagnostirovaniya otdel'nykh blokov aviatsionnogo oborudovaniya s glubinoi poiska otkaza do elementa. [A technique for diagnosing individual blocks of aviation equipment with a failure search depth to the element]. *Sbornik tezisev dokladov «Aktual'nye voprosy issledovaniy v avionike: teoriya, obsluzhivanie, razrabotki» II Vserossiiskoi nauchno-prakticheskoi konferentsii «Aviator»* [Proceedings of abstracts «Topical issues of research in avionics: theory, maintenance, development» of the II All-Russian Scientific and Practical conference «Aviator»]. Voronezh, 2015, pp. 280–282.

### Информация об авторах

**Кашковский Виктор Владимирович**, доктор технических наук, доцент, профессор кафедры информационных систем и защиты информации, Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск; e-mail: viktor.kashkovskiy@mail.ru.

**Устинов Владимир Валентинович**, старший преподаватель кафедры авиационных электросистем и пилотажно-навигационных комплексов, Иркутский филиал Московского государственного технического университета гражданской авиации, г. Иркутск; e-mail: ustinov\_1956n@mail.ru.

**Чобанян Лусине Геворговна**, кафедра авиационных электросистем и пилотажно-навигационных комплексов, Иркутский филиал Московского государственного технического университета гражданской авиации, г. Иркутск; e-mail: lusine.chobanyan@inbox.ru.

### Information about the authors

**Victor V. Kashkovskii**, Doctor of Engineering Science, Associate Professor, Professor of the Department of Information Systems and Information Security, Irkutsk State Transport University, Irkutsk; e-mail: viktor.kashkovskiy@mail.ru.

**Vladimir V. Ustinov**, Assistant Professor of the Department of Aviation Electrical Systems and Pilot Navigation Systems, Irkutsk Branch of the Moscow State Technical University of Civil Aviation, Irkutsk; e-mail: ustinov\_1956n@mail.ru.

**Lusine G. Chobanyan**, the Department of Aviation Electrical Systems and Pilot Navigation Systems, Irkutsk Branch of Moscow State Technical University of Civil Aviation, Irkutsk; e-mail: lusine.chobanyan@inbox.ru.