

КОНТРОЛЬ И ИСПЫТАНИЕ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ И ИХ СИСТЕМ

CONTROL AND TESTING AIRCRAFT AND THEIR SYSTEMS

УДК 629.7.017

doi:10.21685/2307-5538-2022-4-16

АЛГОРИТМ СИНТЕЗА ОПТИМАЛЬНЫХ ТЕСТОВ БОРТОВОЙ РАДИОЭЛЕКТРОННОЙ АППАРАТУРЫ АУТОНОМНЫХ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ НА ОСНОВЕ СИТУАЦИОННЫХ ВЗАИМОДЕЙСТВИЙ ПОДСИСТЕМ

А. И. Лоскутов¹, А. Н. Шиян², В. А. Клыков³, С. А. Неупокоев⁴

^{1,2,3,4} Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского, Санкт-Петербург, Россия
^{1,2} vka@mil.ru, ³ v.klikoff86@mail.ru, ⁴ stas.neupokoev.99@mail.ru

Аннотация. *Актуальность и цели.* Рассмотрена возможность синтеза последовательностей управляющих воздействий для определения вида технического состояния бортовой аппаратуры автономных космических аппаратов при тестовом контроле на этапе применения по назначению. *Материалы и методы.* Решение задачи осуществляется в рамках рассматриваемой математической модели функционирования бортовой радиоэлектронной аппаратуры. С целью сокращения времени отработки тестов, так как затраты времени связаны с затратами других ресурсов автономных космических аппаратов, осуществляется нахождение кратчайших путей между исходными и целевыми состояниями бортовой радиоэлектронной аппаратуры в условиях ситуационного взаимодействия подсистем, режимов работы. Основное внимание уделено разработке алгоритма синтеза оптимальных тестов в зависимости от количественных характеристик модели. Задача сведена к задаче китайского почтальона. *Результаты и выводы.* Проведен анализ вычислительной сложности алгоритмов нахождения кратчайших путей при решении задачи китайского почтальона на основе заданной декомпозированной конечно-автоматной модели бортовой радиоэлектронной аппаратуры.

Ключевые слова: бортовая система контроля, техническое состояние, кратчайший путь, оптимизация, задача китайского почтальона

Для цитирования: Лоскутов А. И., Шиян А. Н., Клыков В. А., Неупокоев С. А. Алгоритм синтеза оптимальных тестов бортовой радиоэлектронной аппаратуры автономных космических аппаратов на основе ситуационных взаимодействий подсистем // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. 2022. № 4. С. 128–138. doi:10.21685/2307-5538-2022-4-16

ALGORITHM FOR SYNTHESIS OF OPTIMAL TESTS OF ONBOARD RADIO ELECTRONIC EQUIPMENT OF AUTONOMOUS SPACE VEHICLES BASED ON SITUATIONAL INTERACTIONS OF SUBSYSTEMS

A.I. Loskutov¹, A.N. Shiyann², V.A. Klykov³, S.A. Neupokoev⁴

^{1,2,3,4} Military Space Academy named after A.F. Mozhaisky, Saint Peterburg, Russia
^{1,2} vka@mil.ru, ³ v.klikoff86@mail.ru, ⁴ stas.neupokoev.99@mail.ru

Abstract. *Background.* The possibility of synthesis of sequences of control actions for determining the type of technical condition of onboard equipment of autonomous space vehicles during test control at the stage of intended use is

considered. *Materials and methods.* The solution of the problem is carried out within the framework of the considered mathematical model of the functioning of on-board radio-electronic equipment. In order to reduce the test processing time, since the time costs are associated with the costs of other autonomous space vehicles resources, the shortest paths between the initial and target states of the on-board radio-electronic equipment are found under conditions of situational interaction of subsystems and operating modes. The main attention is paid to the development of an algorithm for the synthesis of optimal tests, depending on the quantitative characteristics of the model. The problem is reduced to the problem of the Chinese postman. *Results and conclusions.* An analysis of the computational complexity of algorithms for finding the shortest paths in solving the problem of the Chinese postman based on a given decomposed finite-automaton model of on-board radio-electronic equipment is carried out.

Keywords: onboard control system, technical condition, shortest way, optimization, problem of the Chinese postman

For citation: Loskutov A.I., Shiyan A.N., Klykov V.A., Neupokoev S.A. Algorithm for synthesis of optimal tests of onboard radio electronic equipment of autonomous space vehicles based on situational interactions of subsystems. *Izmerenie. Monitoring. Upravlenie. Kontrol' = Measuring. Monitoring. Management. Control.* 2022;(4):128–138. (In Russ.). doi:10.21685/2307-5538-2022-4-16

Введение

Одной из приоритетных задач при создании ракетно-космической техники нового поколения является задача поддержания и продления жизненного цикла космических аппаратов. Основным подходом для решения поставленной задачи является перенос функции принятия решения о виде технического состояния аппаратуры на «борт» космических аппаратов. Для этого создаются и широко используются бортовые системы контроля космических аппаратов, которые способствуют повышению их надежности в целом¹. Однако, как показал анализ [1, 2], существующие подходы при реализации концепции бортового контроля не отвечают в полной мере требованиям к отказоустойчивости. Из этого можно сделать вывод, что вопросы определения нештатных ситуаций в различных ситуациях (режимах) и их парирования на данный момент весьма актуальны. Особенно остро данные вопросы стоят в условиях функционирования автономных космических аппаратов (АКА), когда эффективное решение диагностических задач позволяет своевременно выполнять реконфигурацию бортовой аппаратуры и поставленные целевые задачи.

Постановка задачи разработки алгоритма синтеза оптимальных тестов бортовой радиоэлектронной аппаратуры автономных космических аппаратов на основе представленных ситуационных взаимодействий подсистем графовыми моделями

Разработке алгоритма синтеза оптимальных тестов бортовой радиоэлектронной аппаратуры (БРЭА) космического аппарата с высоким уровнем автономности должно предшествовать формализованное представление предметной области в рамках заданных ограничений. Не определяя на данном этапе точно математический инструмент для формализации процесса функционирования БРЭА, сформулируем математическую постановку задачи разработки алгоритма синтеза оптимальных тестов в общем виде.

Дано:

1. Модель функционирования бортовой радиоэлектронной аппаратуры M_ϕ автономных космических аппаратов. В общем виде, без уточнения инструмента к формализации, M_ϕ может быть представлена следующим образом:

$$M_\phi = \langle \Omega, \tau \rangle, \quad (1)$$

где Ω – множество параметров математической модели БРЭА, характеризующее размерность M_ϕ бортовой аппаратуры; τ – правила, характеризующие отношения на множестве Ω , которые определяют структуру модели M_ϕ в целом.

2. Множество команд управления БРЭА КА $x = \{x_i\}$, $i = \overline{1, n}$, $x \in X_b$.

3. Время выполнение команд управления БРЭА КА t_j , $j = \overline{1, m}$, $t_j \in T$.

¹ ГОСТ 20911–89. Техническая диагностика. Термины и определения. Введ. 1991-01-01.

Необходимо отметить, что множества U_b и T включены в множество Ω ($X_b \subset \Omega$, $T \subset \Omega$).

4. Множество алгоритмов Ω_A для определения вида технического состояния БРЭА АКА в рамках заданной математической модели.

Требуется разработать алгоритм контроля A БРЭА с целью минимизации времени определения вида технического состояния на основе тестов. С формальной точки зрения данная постановка задачи может быть представлена следующим образом:

$$T_k(A(M_\phi, X_b)) \xrightarrow{A \in \Omega_A} \min. \quad (2)$$

С точки зрения решения задачи тестового контроля, а также для объективного отражения причинно-следственных связей, происходящих в бортовой аппаратуре АКА, в различных ситуациях (режимах) удобно рассматривать модели, которые могут быть представлены в виде графовой структуры. Обозначим такой способ формализованного представления функционирования БРЭА АКА как графовые модели (ГМ) [3]. Применение ГМ для описания процессов функционирования бортовой аппаратуры позволяет использовать известные математические методы [4] для построения тестовых последовательностей минимальной длины для решения поставленной задачи (2).

В общем случае графовые модели определяют зависимости, которые лежат между абстрактными элементами модели рассматриваемой системы с возможным представлением в виде графовой структуры [4]. В своей простейшей форме модель определяет напрямую взаимосвязь переменных. ГМ трактуют рассматриваемые системы ориентированным графом, где вершины представляют состояния, а помеченные дуги – связи между ними. Такое представление отношений является наиболее распространенным и отражает иерархическое и сетевое взаимодействие между элементами модели. Вместе с тем данный подход при формальном представлении процесса функционирования бортовой аппаратуры почти всегда сопряжен с проблемой размерности создаваемых математических конструкций (моделей) [5]. Это, прежде всего, обусловлено требуемым уровнем детализации причинно-следственных связей взаимодействия подсистем в БРЭА при решении задачи тестового контроля. Выходом из сложившейся ситуации является логическая декомпозиция формального представления процессов функционирования БРЭА АКА.

Задача тестового контроля при графовом представлении рассматриваемого объекта может быть интерпретирована как обход всех дуг (вершин) ГМ, характеризующих ситуационное взаимодействие (или режимов) подсистем БРЭА АКА. Данная интерпретация позволяет перейти к поиску оптимальных по критерию минимума суммарного времени переходов в рамках математических моделей ситуационного взаимодействия (режимов) функционирования бортовой аппаратуры.

С формальной точки зрения поиск осуществляется среди некоторого множества элементов X_b , которые образуют область поиска в ГМ. Содержательно, совокупность переходов будет определять последовательность тестовых воздействий, необходимых для достоверного определения технического состояния в i -м режиме БРЭА $\bar{x}_i = (x_1, x_2, \dots, x_m)$, $i = \overline{1, n}$, $x_m \in X_b$, $m = \overline{1, k}$. В зависимости от ситуационного взаимодействия (режимов работы) подсистем БРЭА множество векторов \bar{x}_i определяет векторное пространство тестового контроля БРЭА АКА. Размерность данного пространства характеризуется, прежде всего, объемом решаемых задач бортовой аппаратурой. В свою очередь, каждая задача определяется количеством ситуаций взаимодействия между подсистемами бортовой аппаратуры. С математической точки зрения, переход от i -й последовательности тестовых воздействий – \bar{x}_i^k , обусловленных k -й ситуацией взаимодействия между подсистемами, до j -й последовательности – \bar{x}_j^s , обусловленных s -й ситуацией при различных режимах работы БА, может быть определен следующим образом:

$$\bar{x}_j^s = B \bar{x}_i^k, j = \overline{1, g}, i = \overline{1, n}, (x_i, x_j) \in X_b, \quad (3)$$

где $B = \|b_{ks}\|$, $k = \overline{1, h}$, $s = \overline{1, b}$ – прямоугольная матрица размером $h \times b$ с вещественными элементами, характеризующими взаимодействия подсистем бортовой аппаратуры при s -й ситуации.

Необходимо отметить, что элементы b_{ks} принимают бинарное значение: «1» – когда есть взаимодействие, «0» – когда его нет. В общем случае матрица B будет определять ситуационное взаимодействие подсистем бортовой аппаратуры в рамках рассматриваемых режимов работы БРЭА (состояний – V) с управляющими воздействиями на переключение временными командами (E). С учетом выражения (3) постановка задачи (2) может быть уточнена следующим образом:

$$\begin{cases} M_\phi = \langle \Omega, \tau \rangle; \\ \bar{x}_j^s = B\bar{x}_i^k, j = \overline{1, g}, i = \overline{1, n}, (x_i, x_j) \in X_B; \\ A(M_\phi, X_B(B)) \Rightarrow T_k(A) \xrightarrow{A \in \Omega_A} \min; \\ B(V, E). \end{cases} \quad (4)$$

Рассмотрим возможность использования известных методов для оптимизации задачи контроля БРЭА КА по минимальному суммарному времени выполнения команд на основе ГМ.

Анализ возможности синтеза оптимальных тестов бортовой радиоэлектронной аппаратуры автономных космических аппаратов в ситуационных взаимодействиях подсистем графовыми моделями

Задача поиска оптимальных в плане оперативности маршрутов имеет в комбинаторной оптимизации известные интерпретации. Так, рассмотренная постановка задачи (4) может быть рассмотрена как задача китайского почтальона (ЗКП) [6]. Отметим, что ЗКП заключается в поиске кратчайшего цикла, проходящего через каждое ребро модели. Возможность нахождения кратчайших циклов при анализе ГМ БРЭА обусловлена наличием на практике, практически всегда, управляющего воздействия, позволяющего привести бортовую аппаратуру в исходное состояние. Вместе с тем в работе предлагается решать задачу китайского почтальона не за счет анализа полной модели функционирования бортовой аппаратуры, а на основе анализа ситуационного взаимодействия подсистем БРЭА. Другими словами, тестовая последовательность для определения вида технического состояния бортовой аппаратуры будет определяться исходя из предстоящего режима работы БРЭА.

Известно, что одним из этапов решения ЗКП является поиск кратчайших путей (КП) между вершинами модели (1). Задача о поиске КП – это задача поиска самого короткого пути (цепи) между двумя точками (вершинами) на графе, в которой минимизируется сумма весов ребер, составляющих путь. Данная задача является одной из важнейших классических задач теории графов. В настоящее время существует несколько десятков алгоритмов для решения задачи о КП. В табл. 1 приведен сравнительный анализ основных алгоритмов нахождения КП при решении ЗКП.

Таблице 1

Основные алгоритмы поиска КП и их вычислительная сложность

Название алгоритма	Сложность	Краткое описание
Дейкстры	$O(V \cdot V + E)$	Находит кратчайший путь от одной из вершин графа до всех остальных. Алгоритм работает только для графов без ребер отрицательного веса
Флойда – Уоршелла	$O(V^3)$	Находит кратчайшие пути между всеми вершинами взвешенного ориентированного графа
Левита	$O(V \cdot E)$	Находит кратчайшее расстояние от одной из вершин графа до всех остальных. Алгоритм также работает для графов с ребрами отрицательного веса
Джонсона	$O(V^2 \log(V) + V \cdot E)$	Находит кратчайшие пути между всеми парами вершин взвешенного ориентированного графа
Симбела	$O(V^4)$	Находит кратчайшие пути за линейное количество манипуляций (умножения) с матрицей
Алгоритм Ли (волновой алгоритм)	–	Основан на методе поиска в ширину

Как видно из табл. 1, оперативность контроля БРЭА T_k будет являться функцией от вычислительной сложности алгоритмов, которая оценивается временем работы. Чем быстрее будет определяться кратчайший путь, тем будет выше оперативность контроля БРЭА АКА:

$$T_k = O(V, E), \quad (5)$$

где $O(V, E)$ – функция, характеризующая зависимость оперативности определения вида технического состояния от сложности алгоритма нахождения кратчайших путей.

Рассмотрим сложность представленных в табл. 1 алгоритмов (рис. 1) в зависимости от числа состояний подсистем БРЭА АКА. В алгоритме Ли [7] заложен основной принцип «поиск в ширину», т.е. в результате работы алгоритма осуществляется систематический обход всех ребер для «открытия» всех вершин и вычисляется расстояние (минимальное количество ребер) до каждой достижимой вершины. Такой подход для задачи контроля БРЭА является не целесообразным, так как обладает большой погрешностью.

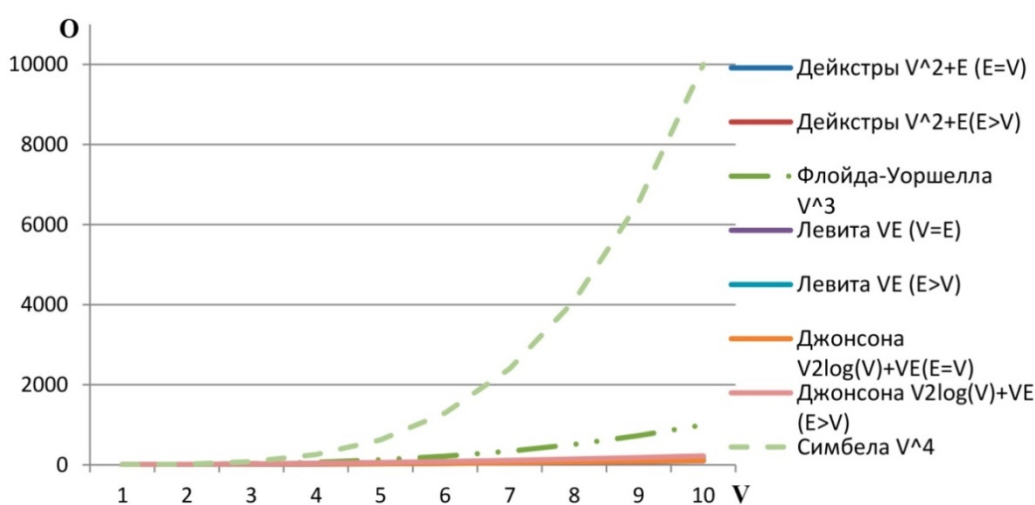


Рис. 1. График вычислительной сложности всех алгоритмов

На рис. 1 можно заметить, что алгоритмы Флойда – Уоршелла и Симбела имеют очень высокие значения сложности (даже при $V = 10$), что не позволяет рассматривать их применение в качестве основы для разработки тестов. Анализ алгоритмов Дейкстры, Левита и Джонсона показал, что время их работы при синтезе тестов будет зависеть не только от количества вершин, но и от количества ребер. Следовательно, необходимо рассмотреть следующие случаи:

- 1) $E = \min, E = V - 1$, когда количество ребер минимально;
- 2) $E = V$, когда количество ребер и вершин совпадает;
- 3) $E > V$, когда ребер больше вершин.

Обозначенные выше случаи соотношений вершин и дуг при графовом описании процесса функционирования БРЭА АКА в полном объеме отражают варианты модельного представления исходя из режимов работы бортовой аппаратуры. Поясним отдельно данное утверждение. В зависимости от режима работы каждая из подсистем БРЭА может взаимодействовать определенным образом, т.е. в рамках рассмотрения полной модели при различных режимах могут быть получены все три случая. Другими словами, данные случаи определяются ситуацией взаимодействия подсистем БРЭА АКА. На рис. 2 представлены результаты работы алгоритмов (в зависимости O от V).

Анализ полученных результатов показал (рис. 2,а,б), что алгоритм Левита оказывается наиболее оперативным при выполнении следующего условия: $E \leq V$, ребер меньше или равно количеству вершин. Алгоритм Дейкстры обладает максимальной эффективностью при выполнении условия: $E > V$, ребер больше вершин (рис. 2,в). Таким образом, в зависимости от ситуации взаимодействия может быть использован один из представленных алгоритмов.

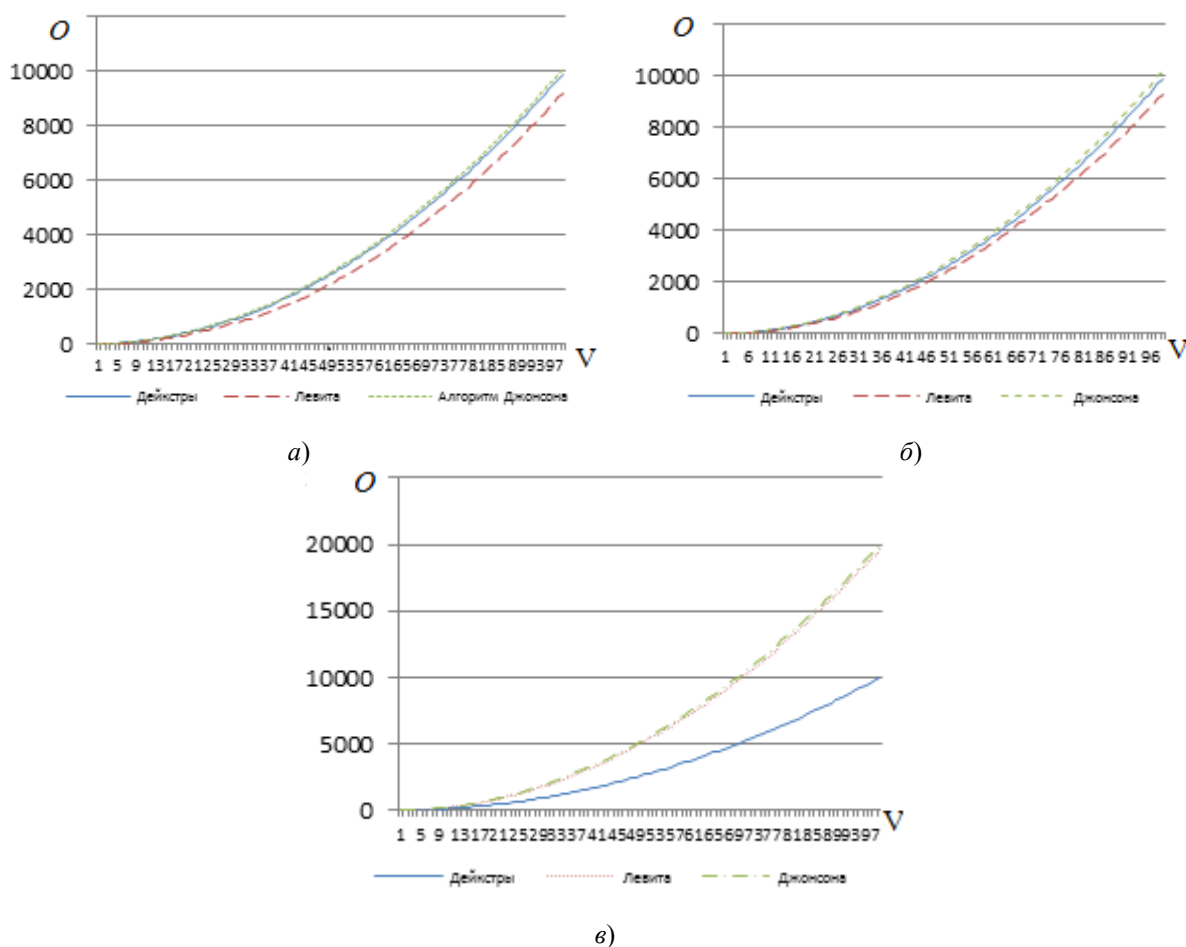


Рис. 2. Оценки вычислительной сложности алгоритмов:
 а – $E = \min$, $E = V - 1$; б – $E = V$; в – $E > V$

Алгоритм синтеза оптимальных тестов бортовой радиоэлектронной аппаратуры автономных космических аппаратов в ситуационных взаимодействиях подсистем графовыми моделями

Для описания процессов функционирования БРЭА АКА введено понятие графовых моделей. С целью получения практических результатов тестового контроля бортовой аппаратуры рассмотрим применение конкретного математического инструмента, попадающего под понятие графовой модели. Наиболее распространенным с практической точки зрения является математический аппарат конечных автоматов [8].

Конечно-автоматное представление процессов функционирования БРЭА обладает рядом достоинств, а именно: развитость теории, относительная простота и адекватность описания дискретных объектов [8]. В свою очередь, декомпозированное представление конечно-автоматной модели позволит решить проблему проклятья размерности [5]. Под декомпозицией конечного автомата понимается его представление в виде других автоматов сети. Каждый из автоматов сети формализует работу подсистемы или нескольких подсистем БРЭА в зависимости логической декомпозиции.

С учетом вышесказанного разработан обобщенный алгоритм работы БСК БРЭА АКА с целью повышения оперативности определения вида ТС на основе конечно-автоматного представления (сетью автоматов) процессов функционирования (ситуационного взаимодействия) бортовой аппаратуры, схема которого представлена на рис. 3.

Условно работу данного алгоритма можно разделить на несколько этапов:

1. На *первом этапе* вводятся данные модели БРЭА (значения функции переходов, значения функции выхода). На их основе выбираем автомат сети A_i (блоки 1–3).

2. На *втором этапе* определяется режим работы БРЭА. Каждый из режимов будет определяться конкретным набором ситуаций взаимодействия подсистем (блок 4).

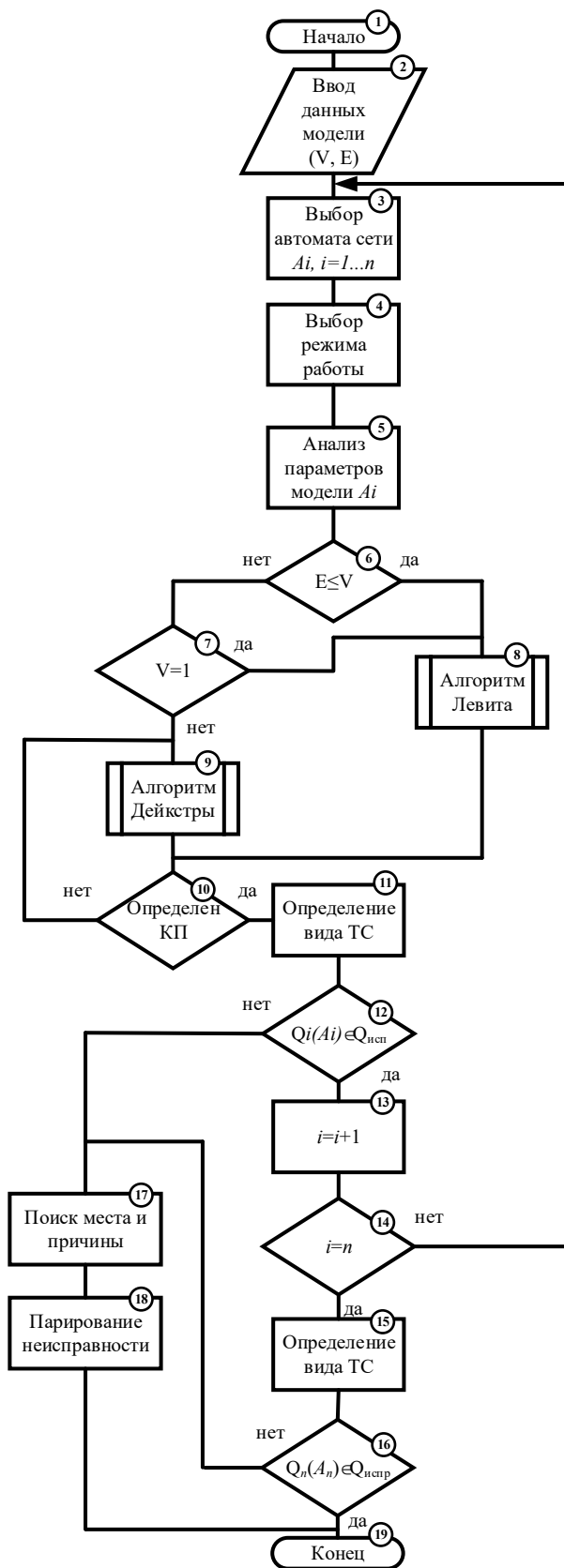


Рис. 3. Алгоритм работы системы контроля с целью повышения оперативности определения вида ТС бортовой аппаратуры

3. Далее анализируются параметры модели A_i в зависимости от ситуационного взаимодействия (режима работы) БРЭА, подсчитывается количество состояний и переходов (блок 5). Проверяется условие выбора алгоритмов на основе сравнения E и V (блоки 6, 7). Выбирается соответствующий алгоритм нахождения КП (Дейкстры или Левита) (блоки 8, 9).

4. На основе выбранного алгоритма определяется тестовая последовательность в зависимости от ситуационного взаимодействия подсистем (режима работы) БРЭА (блок 10).

5. Далее определяется вид технического состояния БРЭА АКА (блок 11). В случае, если контролируемые параметры Y_i бортовой аппаратуры в рамках тестового контроля совпадают с модельными ($Y_i \in Y_{испр}$) в каждый момент времени, то принимается решение об исправности аппаратуры, т.е. выполняется условие $Q_i(A_i) \in Q_{испр}$ с учетом отображения (функции отнесения) – $\varphi^{-1} : Y \rightarrow Q$ (блоки 12–16).

6. Если в результате тестового контроля получено состояние, не принадлежащее множеству исправных, тогда принимается решение о возникновении неисправности в бортовой аппаратуре с последующим поиском места и причин неисправности и ее парирование (блоки 17, 18).

Рассмотрим применение данного алгоритма в рамках оценивания вида ТС бортовой системы контроля с использованием конечно-автоматной модели.

Пример реализации алгоритма синтеза оптимальных тестов типовой бортовой радиоэлектронной аппаратуры космических аппаратов

В качестве БРЭА рассмотрим штатную бортовую радиотелеметрическую систему (БРТС) БР-9ЦК-1 [10], которая используется для телеметрирования космического аппарата¹. В общем случае модель БР-9ЦК-1 представлена в виде сети автоматов, обозначенных в литературе [11, 12] логическими подсистемами (ЛПС). Рассмотрим в качестве примера некоторые ЛПС, описывающие режимы бортовой аппаратуры: ЛПС₁ – логическая подсистема, описывающая режимы работы центрального блока БРТС, ЛПС₂ – логическая подсистема, описывающая режимы запоминающего устройства (рис. 4,а,б).

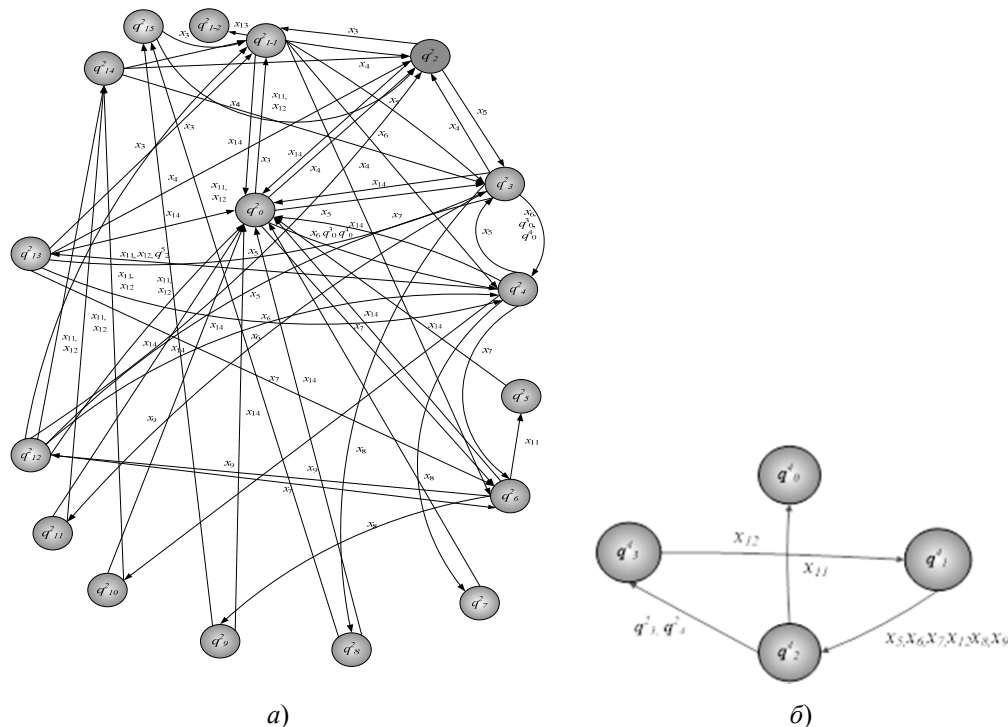


Рис. 4. Графовые модели: а – ЛПС₁; б – ЛПС₂

¹ 14С44 ДПМ ч. 1. Программа телеметрических измерений. Ч.1. Измерения системы БР-9ЦК-1. ФГУП НПО им. С. А. Лавочкина, 2007. С. 32. ; 14С44 ИЭ20 ч. 1. Изделие 14С44. Инструкция по оценке работы бортовых систем. Оценка работы системы БР-9ЦК-1. Часть 1. ФГУП НПО им. С. А. Лавочкина, 2007. 21 с.

Семантическая нагрузка элементов представленной модели на данном этапе является не существенной. Ввиду данного факта ограничимся визуальным восприятием графового представления. На рис. 4,а,б введены обозначения: q_i^j – i -е состояния j -й ЛПС, x_k – управляющие воздействия (команды) на переключение режимов работы бортовой аппаратуры $k = \overline{1, n}$.

Анализ оперативности рассмотренных выше алгоритмов осуществлен для режимов БРТС БР-9ЦК-1 (рис. 4,а,б). Расчеты показали, что в соответствии с временными характеристиками выполнения команд управления ($t_j, j = \overline{1, m}, t_j \in T$) бортовой радиотелеметрической системой оперативность алгоритмов будет иметь следующие значения, представленные в табл. 2.

Таблица 2

Результаты расчета времени работы алгоритмов при нахождении КП для ЛПС БР-9ЦК-1, отн.ед.

Номер	V	E	Симбела	Флойда – Уоршелла	Левита	Джонсона	Дейкстры
ЛПС ₁	17	51	83521	4913	867	908,8	340
ЛПС ₂	4	4	256	64	16	20,8	20

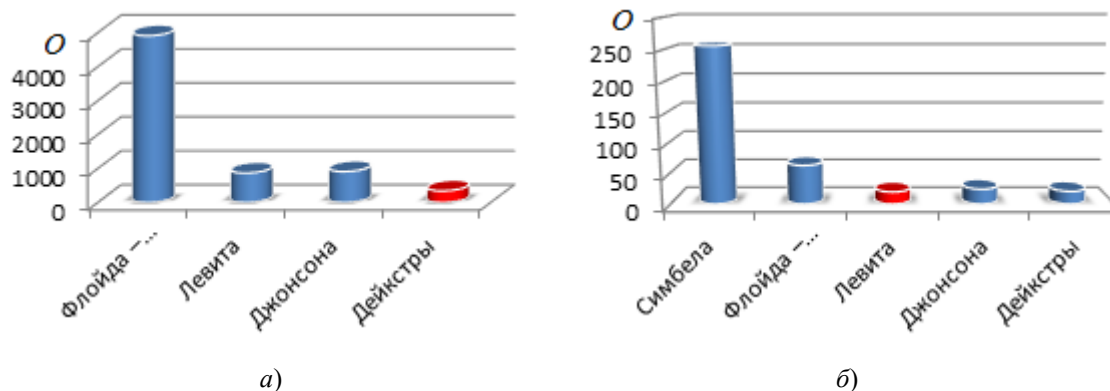


Рис. 5. Оперативность контроля: а – для логической подсистемы 1; б – для логической подсистемы 2

Временная сложность алгоритма Симбела для ЛПС₁ имеет достаточно большой показатель по сравнению с другими, поэтому на диаграмме он не представлен.

Исходя из представленных диаграмм (рис. 5), можно сделать вывод, что в ЛПС₂, при условии $E \leq V$, эффективнее по времени на 20 % будет алгоритм Левита. Для ЛПС₁, при условии $E > V$, выигрыш в оперативности будет в 2,5 раза больше, чем у алгоритма Дейкстры. Полученные результаты в полной мере подтверждают теоретические положения о возможности разработки программно-алгоритмического обеспечения бортовых систем контроля на основе алгоритмов поиска кратчайших путей в рамках решения задачи китайского почтальона при синтезе тестов. В свою очередь, выбор алгоритма с наименьшей временной сложностью в зависимости от ситуационного взаимодействия (режимов работы) БРЭА АКА позволяет повысить оперативность определения вида ТС в целом.

Заключение

Учет ситуационного взаимодействия подсистем БРЭА АКА в различных режимах работы бортовой аппаратуры позволяет решать задачу контроля с применением известных методов комбинаторной оптимизации. Выбор способа нахождения КП в зависимости от ситуации (режима) является эффективным подходом для повышения оперативности контроля бортовой радиоэлектронной аппаратуры. Данный подход на практике может быть использован при переносе функции принятия решения о виде технического состояния аппаратуры на «борт» космических аппаратов в рамках концепции по созданию распределенных систем диагностирования.

Список литературы

1. Байлов В. В., Плаксиенко В. С. Диагностика и обслуживание радиоэлектронных систем бытового назначения : учеб. пособие. Таганрог : Изд-во ТТИ ЮФУ, 2007. 64 с.
2. Хабаров В. Л., Куликов Г. В., Парамонов А. А. Техническая диагностика и ремонт бытовой радиоэлектронной аппаратуры : учеб. пособие. М. : Горячая линия. Телеком, 2004.
3. Емеличев В. А., Ковалев М. М., Кравцов М. К. Многогранники, графы, оптимизация (комбинаторная теория многогранников). М., 1981. 341 с.
4. Алексеев В. Е., Таланов В. А., Графы. Модели вычислений. Структуры данных : учеб. пособие. М. : НГУ им. Н. И. Лобачевского, 2004.
5. Jolliffe I. T. A Note on the Use of Principal Components in Regression // Journal of the Royal Statistical Society. Series C (Applied Statistics). 1982. Vol. 31, № 3. P. 300–303.
6. Kuhn H. W. The Hungarian Method for the assignment problem. 1955. P. 83–97.
7. Lee C. Y. An Algorithm for Path Connections and Its Applications // IRE Transactions on Electronic Computers. 1961. Vol. EC-10, № 2. P. 364–365.
8. Телеметрические системы разгонного блока «Фрегат». М. : ФГУП НПО им. С. А. Лавочкина, 2007. С. 31.
9. Лоскутов А. И., Козырев Г. И. Основы испытаний бортовых радиоэлектронных систем. СПб. : ВКА им. А. Ф. Можайского, 2013. 158 с.
10. Дунаев В. В. Занимательная математика. Множества и отношения. СПб. : БХВ-Петербург, 2008. 336 с.
11. Лоскутов А. И., Клыков В. А. Методика синтеза математической модели функционирования бортовых систем изделий ракетно-космической техники на основе логической декомпозиции // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. 2016. № 5. С. 7–18.

References

1. Baylov V.V., Plaksienko V.S. *Diagnostika i obsluzhivanie radioelektronnykh sistem bytovogo naznacheniya: ucheb. posobie = Diagnostics and maintenance of radio-electronic systems for household use : textbook*. Taganrog: Izd-vo TTI YuFU, 2007:64. (In Russ.)
2. Khabarov V.L., Kulikov G.V., Paramonov A.A. *Tekhnicheskaya diagnostika i remont bytovoy radioelektronnoy apparatury: ucheb. posobie = Technical diagnostics and repair of household radio-electronic equipment : textbook*. Moscow: Goryachaya liniya. Telekom, 2004. (In Russ.)
3. Emelichev V.A., Kovalev M.M., Kravtsov M.K. *Mnogogranniki, grafy, optimizatsiya (kombinatornaya teoriya mnogogrannikov) = Polyhedra, graphs, optimization (combinatorial theory of polyhedra)*. Moscow, 1981:341. (In Russ.)
4. Alekseev V.E., Talanov V.A., *Grafy. Modeli vychisleniy. Struktury dannykh: ucheb. posobie = Models of calculations. Data structures : textbook*. Moscow: NGU im. N. I. Lobachevskogo, 2004. (In Russ.)
5. Jolliffe I.T. A Note on the Use of Principal Components in Regression. *Journal of the Royal Statistical Society. Series C (Applied Statistics)*. 1982;31(3):300–303.
6. Kuhn H.W. The Hungarian Method for the assignment problem. 1955:83–97.
7. Lee C.Y. An Algorithm for Path Connections and Its Applications. *IRE Transactions on Electronic Computers*. 1961:EC-10(2):364–365.
8. *Telemetricheskie sistemy razgonnogo bloka «Fregat» = Telemetry systems of the Fregat upper stage*. Moscow: FGUP NPO im. S. A. Lavochkina, 2007:31. (In Russ.)
9. Loskutov A.I., Kozzyrev G.I. *Osnovy ispytaniy bortovykh radioelektronnykh sistem = Fundamentals of testing of onboard radio-electronic systems*. Saint Petersburg: VKA im. A. F. Mozhayskogo, 2013:158. (In Russ.)
10. Dunaev V.V. *Zanimatel'naya matematika. Mnozhestva i otnosheniya = Entertaining math. Sets and relations*. Saint Petersburg: BKhV-Peterburg, 2008:336. (In Russ.)
11. Loskutov A.I., Klykov V.A. Method of synthesis of mathematical model of functioning of boron systems of rocket and space technology products on the basis of logical decomposition. *Pribory i sistemy. Upravlenie, kontrol', diagnostika = Instruments and systems. Management, control, diagnostics*. 2016;(5):7–18. (In Russ.)

Информация об авторах / Information about the authors

Андрей Иванович Лоскутов

доктор технических наук,
начальник кафедры телеметрических систем,
комплексной обработки и защиты информации,
Военно-космическая академия
имени А. Ф. Можайского
(Россия, г. Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13)
E-mail: vka@mil.ru

Andrey I. Loskutov

Doctor of technical sciences,
head of the sub-department of telemetric systems,
integrated processing and information protection,
Military Space Academy
named after A.F. Mozhaysky
(13 Zhdanovskaya street, St. Petersburg, Russia)

Александр Николаевич Шиян

заместитель начальника отдела,
Военно-космическая академия
имени А. Ф. Можайского
(Россия, г. Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13)
E-mail: vka@mail.ru

Aleksandr N. Shiyan

Deputy head of the department,
Military Space Academy
named after A.F. Mozhaisky
(13 Zhdanovskaya street, St. Petersburg, Russia)

Владимир Алексеевич Клыкков

кандидат технических наук,
преподаватель кафедры телеметрических систем,
комплексной обработки и защиты информации,
Военно-космическая академия
имени А. Ф. Можайского
(Россия, г. Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13)
E-mail: v.klikoff86@mail.ru

Vladimir A. Klykov

Candidate of technical sciences,
lecturer of the sub-department
of telemetry systems, integrated processing
and information security,
Military Space Academy
named after A.F. Mozhaisky
(13 Zhdanovskaya street, St. Petersburg, Russia)

Станислав Алексеевич Неупокоев

курсант,
Военно-космическая академия
имени А. Ф. Можайского
(Россия, г. Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13)
E-mail: stas.neupokoev.99@mail.ru

Stanislav A. Neupokoev

Cadet,
Military Space Academy
named after A.F. Mozhaisky
(13 Zhdanovskaya street, St. Petersburg, Russia)

**Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов /
The authors declare no conflicts of interests.**

Поступила в редакцию/Received 27.05.2022

Поступила после рецензирования/Revised 29.06.2022

Принята к публикации/Accepted 28.07.2022