

А.И. Лоскутов, Г.И. Козырев, В.А. Клыков, О.Л. Шестопалова
**СИНТЕЗ АДАПТИВНЫХ МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ
БОРТОВЫХ РАДИОЭЛЕКТРОННЫХ СИСТЕМ
КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ НА ОСНОВЕ ПРИМЕНЕНИЯ
ГОМОЛОГИЧНЫХ МАТЕМАТИЧЕСКИХ СТРУКТУР**

Лоскутов А.И., Козырев Г.И., Клыков В.А., Шестопалова О.Л. Синтез адаптивных математических моделей бортовых радиоэлектронных систем космических аппаратов на основе применения гомологичных математических структур.

Аннотация. В статье рассматриваются вопросы синтеза адаптивных математических моделей применительно к задачам технического диагностирования бортовых радиоэлектронных систем (БРЭС) космических аппаратов (КА). Сформулирована задача синтеза адаптивной модели БРЭС КА в общем виде с использованием преобразования исходной математической структуры в гомологичную структуру меньшей размерности. Представлен подход к синтезу адаптивных моделей на основе использования математического аппарата конечных автоматов. Новизна подхода заключается в том, что гомологичная структура меньшей размерности синтезирована за счет преобразования отношений между элементами множества телеметрируемых (контролируемых) параметров (выходных переменных конечно-автоматной модели). Приведен пример синтеза адаптивной к процессу контроля технического состояния математической модели центрального блока бортовой радиотелеметрической системы. Выполнено оценивание эффективности синтезированной адаптивной модели БРЭС КА по показателю оперативности путем решения задачи «китайского почтальона».

Ключевые слова: техническое диагностирование, контроль, бортовая аппаратура, космический аппарат, математическая модель, конечный автомат.

1. Введение. Современный этап развития изделий ракетно-космической техники (РКТ) характеризуется повышением требований к эффективности их функционирования. В свете указанных требований увеличение сроков активного существования и автономности космических аппаратов является одним из основных частных показателей эффективности функционирования КА, связанных не только с развитием элементной базы, но и с совершенствованием специального математического обеспечения (СМО) функционирования бортовой аппаратуры КА [1]. В свою очередь, создание перспективных КА с высокими целевыми и эксплуатационными характеристиками требует разработки новых подходов к решению проблемы обеспечения работоспособности бортовых систем как специальных, так и служебных. Важнейшим направлением решения данной проблемы является разработка и создание систем контроля и диагностирования, которые позволяют при достаточно низком уровне ресурсных затрат с требуемой достоверностью и полнотой оценивать техническое состояние бортовых систем (БС), а также формировать воздействия по управлению в процессе его целевого применения. Разработка таких

систем невозможна без математического моделирования функционирования современной высокотехнологичной бортовой аппаратуры (БА) и решения оптимизационных задач над множеством данных моделей [2]. В [3] приведены основные требования к построению данного рода моделей. В условиях автономного функционирования, когда система обладает обширным спектром ресурсных ограничений (временных, энергетических) наиболее актуальным представляется требование по адаптивности синтезируемой модели процессов функционирования БА КА под конкретную задачу. Данный факт подтверждается перспективным направлением в области создания систем автономного контроля [4], разрабатываемых с учетом моделей бортовой аппаратуры, построенных на основе различных математических инструментов [5-9].

2. Постановка задачи синтеза адаптивных математических моделей бортовых систем космических аппаратов. Из работы [10] известно, что адаптивность есть свойство модели, позволяющее менять параметры, задавать точность, перестраивать структуру модели, изменять взаимодействие ее элементов с учетом изменяющихся условий под определенные задачи, в частности под задачу контроля и (или) технического диагностирования. В теории моделирования модель рассматривается как некоторая конкретная математическая структура, которая в общем виде может быть представлена в виде набора базисных множеств вместе с одним или несколькими отношениями, заданными на множестве из этого набора [11]:

$$\Sigma = \langle \Omega; R \rangle, \quad (1)$$

где $\Omega = \{X_1, X_2, \dots, X_n\}$ — набор базисных множеств; $R = \{r_1, r_2, \dots, r_g\}$ — набор отношений над базисными множествами Ω .

В свою очередь, синтез адаптивной модели подразумевает возможность преобразования выражения (1) в гомологичную математическую структуру Σ' , синтезированной под задачу контроля технического состояния конкретной бортовой РЭС:

$$\eta: \Sigma \rightarrow \Sigma', \quad (2)$$

где $\Sigma' = \langle \Omega', R' \rangle$ — гомологичная математическая структура, которая характеризуется одинаковыми по отношению к структуре (1) схемами

образования отношений $R' = \{r'_1, r'_2, \dots, r'_g\}$, заданными на системе базисных множеств $\Omega' = \{X'_1, X'_2, \dots, X'_n\}$.

С математической точки зрения, преобразование (2) может быть определено с помощью гомоморфного отображения (гомоморфизма):

$$\eta \in \text{Hom}(\Sigma, \Sigma'). \quad (3)$$

В общем виде гомоморфизмом или гомоморфным отображением математической структуры (1), заданной на базисных множествах Ω , в математическую структуру Σ' , заданную на базисных множествах Ω' , называется такой канонический кортеж отображений $\langle \lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_n \rangle$, который удовлетворяет следующему условию для соответствующих отношений R и R' этих структур [3]:

$$\forall (\langle x_1, x_2, \dots, x_n \rangle) \langle x_1, x_2, \dots, x_n \rangle \in R \Rightarrow \langle \lambda_1(x_1), \lambda_2(x_2), \dots, \lambda_n(x_n) \rangle \in R', \quad (4)$$

где запись $\langle x_1, x_2, \dots, x_n \rangle \in R$ означает, что элементы $\langle x_1, x_2, \dots, x_n \rangle$ связаны между собой отношением R , а запись $\langle \lambda_1(x_1), \lambda_2(x_2), \dots, \lambda_n(x_n) \rangle \in R'$ означает, что элементы $\langle \lambda_1(x_1), \lambda_2(x_2), \dots, \lambda_n(x_n) \rangle$ связаны между собой отношением R' .

Необходимо отметить, что если отображения $\lambda_i, i=\overline{1, n}$, в выражении (4) являются биективными, то образованная математическая конструкция Σ' будет изоморфизмом по отношению к (1). При этом будут отсутствовать потери информации. Однако наибольший практический интерес представляет случай, когда отображения $\lambda_i (i=\overline{1, n})$ есть сюръективные отображения, и следовательно, эти отображения можно назвать агрегирующими функциями [3]. В результате преобразования данных функций модель Σ' будет уже эпиморфизмом по отношению к Σ . Каждая такая функция индуцирует соответствующее фактор-множество агрегирования X'_i / λ_i и, если удастся построить соответствующую фактор-модель, то можно сказать, что она отражает взаимосвязи между элементами исходной структуры с точностью или разрешающей способностью, необходимой для решения целевых задач, то есть до элементов или до классов эквивалентности. При этом отношения между элементами x_i заменяются отношениями между классами эквивалентности x'_i .

Согласно ГОСТу [12], задачами технического диагностирования БА КА являются контроль технического состояния (ТС), поиск места и определение причин отказа (неисправности) и прогнозирование ТС. Решение каждой из трех задач технического диагностирования характеризуется своими показателями P и целевой функцией F , в рамках которой будет решаться оптимизационная задача по выбранному показателю оптимальности:

$$F(P) \rightarrow opt. \quad (5)$$

Таким образом, математическая постановка задачи синтеза адаптивной к процессу технического диагностирования математической модели заключается в нахождении отображения (2), позволяющего синтезировать гомологичную математическую структуру (3) при условии (4) в рамках оптимального решения задачи (5):

$$\left\{ \begin{array}{l} \lambda : \Sigma \rightarrow \Sigma', \\ \lambda \in Hom(\Sigma, \Sigma'), \\ \forall (\langle x_1, x_2, \dots, x_n \rangle) \langle x_1, x_2, \dots, x_n \rangle \in R \Rightarrow \langle \lambda_1(x_1), \lambda_2(x_2), \dots, \lambda_n(x_n) \rangle \in R', \\ F(P) \rightarrow opt. \end{array} \right. \quad (6)$$

Определение отображения (2) зависит от математического аппарата (инструментария) с помощью которого осуществляется формализация процессов функционирования. В свою очередь, сама процедура формализации процессов функционирования будет зависеть от свойств моделируемого объекта.

3. Синтез адаптивных математических моделей бортовых радиоэлектронных систем космических аппаратов для решения задачи технического диагностирования.

3.1. Обоснование выбора математического аппарата конечных автоматов для формализации процесса функционирования бортовой радиоэлектронной аппаратуры космического аппарата. В состав современных КА входит значительное число разнообразной по своему назначению бортовой аппаратуры, каждая из которых является достаточно сложной технической системой. Отдельные бортовые системы КА реализуют различные алгоритмы функционирования и имеют, соответственно, различную структуру и различную организацию функционально-информационного обмена между элементами. Таким образом, большинство бортовых систем объекта является неоднородным по своей структуре и функциональным свойствам. Поэтому для описания

разных компонентов бортовых систем требуются различные математические инструменты. При этом возникает проблема сопряжения разнородных математических моделей между собой. В итоге модель всей рассматриваемой системы получается весьма сложной и громоздкой, вследствие чего они зачастую оказываются малопригодными для решения задач диагностики, так как в них не описывается механизм появления отказов и их влияние на работоспособность контролируемых систем.

Отмеченные обстоятельства создают определенные трудности для практического использования моделей, построенных на основе определенных математических инструментов, при решении задачи технического диагностирования. Для преодоления этих трудностей необходимо применение модели с более высоким уровнем абстракции, которая позволяла бы рассматривать все технические системы объекта (или хотя бы большинство из них) с позиций единого методологического подхода. Кроме того, исходя из общей постановки задачи определения технического состояния отдельных систем и всего объекта в целом, необходимо иметь такую модель, в которой учитывалась бы возможность появления случайных отказов в моделируемом объекте. И, наконец, модель должна быть удобной для ее реализации на вычислительных средствах, в смысле приемлемого объема потребной памяти и быстродействия.

Следует, однако, отметить, что повышение уровня абстракции модели неизменно влечет за собой определенную идеализацию, при которой исключаются из рассмотрения некоторые несущественные стороны контролируемого объекта, а основное внимание сосредотачивается на главных его свойствах. Лишенная некоторых деталей, такая модель неполно характеризует исследуемый объект, но, во-первых, именно поэтому его легче изучать и, во-вторых, требуется использовать для этих целей значительно меньше информации. Это дает существенный выигрыш во времени, которое затрачивается на получение результата контроля технического состояния БА КА. Данный фактор при техническом диагностировании зачастую играет определяющую роль, поэтому использование таких моделей становится наиболее целесообразным.

Обширный опыт создания моделей поведения различных объектов, изучаемых в различных теориях, был обобщен в рамках общей теории систем, которая имеет междисциплинарный характер. Результатом этого обобщения явилась некоторая модель, получившая название динамической системы [11, 13].

На практике наиболее изучены свойства некоторых специальных видов динамических систем. С одной стороны, они проще в изучении, а

с другой — они достаточно хорошо описывают многие реальные объекты. К таким видам относят вероятностные динамические системы, стационарные динамические системы, а также дискретные и непрерывные динамические системы. В общем виде динамические системы и различные их подклассы допускают широкий спектр возможных представлений, использующих различный математический аппарат. Каждый из возможных формализмов характеризуется своей техникой и отражает определенную точку зрения на предметную область, применительно к которой он используется.

В общем случае математический аппарат, используемый для формализации процессов функционирования БА, может быть различным. Синтез математических моделей при решении задачи технического диагностирования бортовой радиоэлектронной аппаратуры КА удобно осуществлять с помощью математического аппарата стационарных дискретных динамических систем. В литературе [14-17] подробно рассмотрены вопросы математического моделирования и решения задачи технического диагностирования с применением агрегированных моделей. С математической точки зрения данный вид моделей можно представить следующей математической конструкцией [3]:

$$\Sigma_g = \langle E, \Pi, T^*, R, \Psi, P, C, A, B \rangle, \quad (7)$$

где E — множество технических состояний; Π — совокупность проверок, необходимых для определения видов технического состояния E ; T^* — множество моментов времени выполнения проверок Π ; R — множество признаков всех технических состояний E ; Ψ — оператор, устанавливающий связь между множеством состояний E , множеством проверок Π и множеством моментов времени T их выполнения с одной стороны, и множеством ожидаемых исходов проверок R с другой; P — вероятностная мера, заданная на множестве E ; C — множество цен проверок Π ; A, B — множество ошибок первого и второго рода для выполненных проверок.

Множества E, Π, T^*, R в модели (7) являются базовыми и используются для непосредственной организации процесса диагностирования. Множества P, C, A, B задают ограничения, которые используются для оптимизации процедуры диагностирования. Особенностью данной модели является то, что в ней описывается изменения состояния объекта, как функции времени, но не раскрываются причинно-следственные связи, вызывающие это изменение вследствие отсутствия в модели множества входных воздействий, вызывающих

переход объекта из одного технического состояния (определенного в рамках синтезированной модели) в другое [3].

Необходимо отметить, что данная модель является наиболее полной с точки зрения контроля технического состояния стационарных дискретных динамических систем. Однако на практике, вследствие сложности получения априорных данных, необходимых для построения математической модели (определение множеств P , C , A , B), невозможности раскрытия причинно-следственных связей, а также из-за большой размерности получаемых моделей, возникает необходимость применения менее сложных математических аппаратов, таких как сети Петри [18, 19] или конечно-автоматные модели [20, 21]. Далее в работе будет рассмотрен подход для формализации процессов функционирования БРЭА КА на основе применения математического аппарата конечных автоматов.

Данный математический аппарат обладает рядом достоинств, а именно: развитость теории, относительная простота и адекватность описания дискретных объектов (во времени и по состояниям), использование для их изучения финитных методов логики и алгебры.

Существует множество объектов контроля и управления, связанных с большой ответственностью: ядерные и химические реакторы, комплексы оборонного и космического назначения и тому подобное. Успех в работе с ними прямо зависит от четкости и слаженности действий, от умения принимать выверенные решения и грамотно анализировать ситуацию, от возможности однозначной интерпретации информации. Различная природа физических процессов, протекающих в объектах, сложный характер взаимодействия между ними обуславливает трудности разработки, алгоритмизации и программирования задач контроля и управления. Возникают также трудности, связанные с необходимостью достижения наглядности и структурированности. Для решения этих задач используется развитый математический аппарат теории автоматов [22-25]. Описание логики поведения при автоматном подходе структурировано. Это свойство делает автоматное описание сложного поведения наглядным и ясным. Корректность работы при использовании автоматов закладывается еще на этапе проектирования благодаря графическому представлению процессов функционирования сложных объектов. Однако при применении конечно-автоматных моделей часто возникают трудности при синтезе алгоритмов контроля на основе данных моделей в виду большой размерности получаемых математических конструкций, так называемое «проклятие размерности».

Обычно конечный автомат описывается в виде упорядоченной пятерки [22-25]:

$$A = \langle X, Y, Q, f, \varphi \rangle, \quad (8)$$

где X — множество входных воздействий (алфавит входных символов); Y — множество выходных переменных или телеметрируемых параметров (алфавит выходных символов); Q — множество состояний; $f: Q \times X \rightarrow Q$ — функция переходов; $\varphi: Q \rightarrow Y$ — функция выходов для автомата Мура (автомата 2-го рода).

Значениями функции переходов модели являются состояния $q(t+1) = f(q(t), x(t))$, в которых оказывается автомат в момент времени $t+1$, если в предыдущий момент времени t он находился в состоянии $q(t)$ и подвергался воздействию $x(t)$.

Значениями функции выходов являются выходы $y(t) = \varphi(q(t))$, определяемые только текущим состоянием.

Вместо времени обычно пользуются тактами или словосочетаниями: предыдущее состояние, последующее состояние:

$$q_{i+1} = f(q_i, x_i); \quad q_i \xrightarrow{x_i} q_{i+1}, \quad \varphi(q_i) = y_i.$$

Построение адаптивных моделей бортовой аппаратуры автономных КА на основе математического аппарата конечных автоматов с целью технического диагностирования может быть осуществлено исходя из подзадач технического диагностирования, а именно: синтеза модели с целью контроля технического состояния (ТС) и синтеза модели с целью диагностирования. При этом речь идет о структурной адаптации, связанной с минимизацией пространства состояний при решении конкретной задачи, так как изменение мощности множества (количества) состояний исходной конечно-автоматной модели приводит к изменению ее структуры.

Под контролем ТС понимается определение вида ТС объекта. Под диагностированием в данном случае будем понимать поиск места и определение причин отказа (неисправности) [12]. В зависимости от этапа эксплуатации и решаемых целевых задач в качестве цели контроля могут рассматриваться проверка исправности, проверка работоспособности или проверка правильности функционирования. Минимальным по объему является контроль правильности функционирования БА КА в заданный момент времени (с учетом предыстории) при его применении по назначению. На этом этапе более полный контроль (проверка исправности или работоспособности), как правило, не осуществляется. В связи с этим возникает необходимость преобразования моделей объектов контроля вида (8),

удовлетворяющих требованиям достоверности и оперативности, в особенности, на этапе автономного функционирования БА КА.

Каждое состояние q_i конечно-автоматной модели (КАМ) характеризуется своим образом $(y_1^i, y_2^i, \dots, y_m^i)^m$ в m -мерном пространстве, $i = \overline{1, n}$. Из литературы [26] известно, что одним из направлений оптимизации решения задачи контроля является сокращение размерности пространства состояний путем нахождения обобщенных диагностических признаков. Данный поиск может быть реализован при помощи агрегирующей функции $\lambda_i (i = \overline{1, n})$ над множеством выходных переменных, удовлетворяющей условию (4):

$$\left\{ \begin{array}{l} \lambda : Y \rightarrow Y' \Rightarrow Q' : |Q| \rightarrow \min, |Y'| < |Y|, \\ \langle y_1, y_2, \dots, y_n \rangle \in Q \Rightarrow \langle \lambda_1(y_1), \lambda_2(y_2), \dots, \lambda_k(y_k) \rangle \in Q_{\min}, k < n. \end{array} \right. \quad (9)$$

В результате этого математическая конструкция (11) примет вид:

$$A_{\min} = \langle X, Q' | Q_{\min}, f, \varphi \rangle. \quad (10)$$

Математическая конструкция вида (10) называется минимальной формой конечно-автоматной модели. В теоретическом плане A_{\min} является изоморфизмом по отношению к исходной полной конечно-автоматной модели A (8), так как преобразование (9) происходит без потерь в информационном плане:

$$A_{\min} \cong A. \quad (11)$$

Однако на практике реализовать соответствие (11) при построении модели (10) весьма затруднительно ввиду наличия потерь в процессе преобразования (9). Обычно преобразование модели (8) в модель (10) является эпиморфизмом:

$$\lambda : A \rightarrow A_{\min} \Rightarrow \left\{ \begin{array}{l} \lambda \in \text{Hom}(A, A_{\min}) \\ m \circ f = h \circ f \Rightarrow m = h, \end{array} \right. \quad (12)$$

где $m \circ f = h \circ f \Rightarrow m = h$ – условие эпиморфизма.

Синтез модели (10) может быть реализован поиском семантически обобщенного параметра на множестве выходных переменных (телеметрируемых параметров) Y и построением минимальной формы конечного автомата (минимизации конечного

автомата) за счет вновь образованных классов эквивалентности по обобщенному параметру. Каждому параметру из Y' необходимо сопоставить класс всех тех телеметрических сообщений $S_k \in Y$, которые могут быть отображены в данный параметр за счет некоторого отображения. Построение такого класса является обобщением входящих в него телеметрических сообщений по индивидуальным (семантическим) признакам, присущим только данному классу. Процесс определения обобщенного параметра можно представить в виде коммутативной диаграммы [26] (рисунок 1):

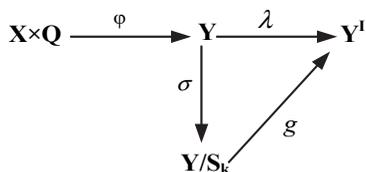


Рис. 1. Коммутативная диаграмма нахождения обобщенных диагностических признаков

Функция выходов представляет собой последовательность отображений φ и λ , которые позволяют преобразовывать множества текущих состояний в множество обобщенных параметров Y' . Последнее отображение, в свою очередь, также является композицией двух отображений. В общем случае определение обобщенного параметра можно разделить на несколько этапов:

1. На первом этапе в результате отображения φ происходит определение исходного множества телеметрируемых параметров Y из текущих состояний Q :

$$\varphi: Q \rightarrow Y. \quad (13)$$

2. На втором этапе в результате семантического анализа вектора телеметрических данных $q_j = \{y_i\}$, где $i = \overline{1, m}, j = \overline{1, r}$ происходит определение классов телеметрических сообщений $S_k = \{q_f\}$, $f = \overline{1, r}, k = \overline{1, s}$, по семантически общему признаку, присущему данному классу сообщений, то есть, осуществляется факторизация исходного множества Y . Данная операция представляется в виде отображения:

$$\sigma : Y \rightarrow Y / S_k. \quad (14)$$

По своему смыслу данное отображение является наложением (сюръекцией) и называется естественным отображением [27, 28].

3. На третьем этапе осуществляется определение обобщенных диагностических признаков $y'_i \in Y'$, которые будут индивидуальны для каждого класса S_k . Данная операция представляется в виде взаимно-однозначного отображения:

$$g : Y / S_k \rightarrow Y'. \quad (15)$$

В общем случае поиск обобщенного диагностического признака представляет собой композицию отображений g и k :

$$\lambda = \sigma \circ g. \quad (16)$$

Из литературы [22] известно, что минимизация числа состояний исходного автомата связана с анализом эквивалентности этих состояний. Определение обобщенного диагностического признака по отображению λ приведет к образованию классов эквивалентности и, соответственно, минимизации числа состояний.

Представленный способ преобразования исходной модели объекта показывает возможность синтеза адаптивной к процессам контроля или технического диагностирования математической модели с целью построения оптимальных алгоритмов контроля на основе обобщенных диагностических признаков.

Основным содержанием задачи построения алгоритма контроля технического состояния БА КА является синтез программ контрольных испытаний (ПКИ), задающих последовательность управляющих воздействий при проведении электрических проверок, которая осуществляет обход переходов в рамках синтезированной математической модели.

Известно из [22], что при описании исправных бортовых систем КА конечно-автоматной моделью наличие дефекта в КА соответствует трансформации его в новый конечный автомат, отличающийся от модели исправного КА. В этом случае построение программы контрольных испытаний может быть сведено к синтезу ПКИ, позволяющей отличить конечный автомат, моделирующий функционирование исправной БА, от любого другого конечного

автомата, ему не эквивалентного. При этом обязательно должен быть зафиксирован класс неисправностей, обнаруживаемых в рамках используемой модели. Таким образом может быть решена задача поиска места и выявления причин отказа, определяемая глубиной диагностирования бортовых систем КА. В свою очередь, для решения задачи контроля время на выполнение всей ПКИ нужно свести к минимуму:

$$t(X^*) = \sum_{i=1}^k \Delta t_i \rightarrow \min, \quad (17)$$

где X^* — программа контрольных испытаний, необходимая для принятия решения о виде технического состояния БС КА; Δt_i — время, необходимое на выполнение управляющего воздействия из X^* .

Данная задача может решаться либо нахождением цикла, удовлетворяющего условию (17), за счет мощных алгоритмических средств, разработанных в теории графов, либо за счет преобразования и уменьшения размерности самой модели не ниже требуемого уровня.

4.2. Пример синтеза адаптивной математической модели бортовой радиотелеметрической системы космического аппарата на основе математического аппарата конечных автоматов. В качестве примера рассмотрим синтез декомпозированной конечно-автоматной модели бортовой радиотелеметрической системы (БРТС) БР-9ЦК-1 [29]. Произведенный синтез математической модели БРТС на основе технической документации (описательной или вербальной модели) [30-32] позволил получить пять логических подсистем (ЛПС), формализующих процесс функционирования пяти блоков исходной системы БР-9ЦК-1. В свою очередь, были получены подавтоматы работы передатчика, запоминающего устройства, системы питания, датчика времени и центрального блока. Рассмотрим логическую подсистему центрального блока, характеризующую режимы функционирования всей БРТС, с целью определения возможности синтеза адаптивной модели под задачу контроля технического состояния. В общем виде образ (телеметрический образ) $(y^i_1, y^i_2, \dots, y^i_m)^T$ каждого состояния q_i центрального блока характеризуется структурой командно-служебного слова (КСС), которая, в свою очередь, определяет режим функционирования БРТС в целом.

В таблице 1 представлены управляющие воздействия (УВ), подаваемые на БРТС в процессе наземных испытаний и режимы ее функционирования [30-32].

Таблица 1. Управляющие воздействия и режимы функционирования БРТС

Номер УВ, x_i	Обозначение команды (УВ)	Время выполн.команды Δt , с	Содержание команды и режим функционирования БРТС
x_1	«Питание вкл»	3	Подача питания на систему
x_2	«Питание выкл»	3	Снятие питания с системы
x_3	«НП256»	10	Включение режима непосредственной передачи (НП) с информативностью 25600 изм/с
x_4	«НП32»	10	Включение режима НП с информативностью 3200 изм/с
x_5	«НП32+ЗАП32»	10	Включение совмещенного режима НП и записи с информативностью 3200 изм/с
x_6	«ЗАП8»	10	Включение режима записи с информативностью 800 изм/с
x_7	«НП8+ЗАП8»	10	Включение совмещенного режима НП и записи с информативностью 800 изм/с
x_8	«В32»	10	Включение режима воспроизведения с информативностью 3200 изм/с
x_9	«В8»	10	Включение режима воспроизведения с информативностью 800 изм/с
x_{10}	«НОВ»	3	Обнуление датчика времени (ДВ) и запуск схемы программно-временного устройства (ПВУ) с нулевой отметки
x_{11}	«СТОП ЗУ»	3	Остановка запоминающего устройства (ЗУ)
x_{12}	«ИСХ.ЗУ»	3	Приведение ЗУ в исходное состояние (подготовка к записи)
x_{13}	«ВЫКЛ. ПРД»	3	Выключение передатчиков (технологическая команда)
x_{14}	«ВЫКЛ. ТМ»	3	Выключение системы, кроме схемы ДВ и ПВУ
x_{15}	«ТК»	3	Работа схемы ПВУ в ускоренном режиме (технологическая команда)

Словесные описания состояний (содержательные состояния) в соответствии с режимами логических подсистем, а также значения контролируемых (выходных) параметров в виде функции выходов представлены в таблице 2 [31].

Таблица 2. Функция выходов для ЛПС₂ в табличной форме

Состояния ЛПС, режим функционирования	Допуск параметра
q^2_0 — дежурный режим	0 0 0 0 0 0 0 0
q^2_1 — режим НПс информативностью 25600 изм/с (НП256)	0 1 0 0 0 0 1 1
q^2_2 — режим НПс информативностью 3200 изм/с (НП32)	0 1 0 0 0 0 0 1
q^2_3 — совмещенный режим записи и НПс информативностью 3200 изм/с (ЗАП32+НП32)	0 1 1 0 0 0 0 1
q^2_4 — режим записи с информативностью 800 изм/с (ЗАП8)	0 0 1 1 0 0 1 0
q^2_5 — режим НПс информативностью 800 изм/с (НП8)	0 1 0 0 0 0 1 0
q^2_6 — совмещенный режим записи и НПс информативностью 800 изм/с (НП8+ЗАП8)	0 1 1 1 0 0 1 0
q^2_7 — режим воспроизведения с информативностью 3200 изм/с после записи с информативностью 800 изм/с (В32 (от ЗАП8))	0 0 1 1 0 1 0 1
q^2_8 — режим воспроизведения с информативностью 3200 изм/с после совмещенного режима ЗАП32+НП32 (В32 (от ЗАП32+НП32))	0 1 1 0 0 1 0 1
q^2_9 — режим воспроизведения с информативностью 3200 изм/с после совмещенного режима НП8+ЗАП8 (В32(от НП8+ЗАП8))	0 1 1 1 0 1 0 1
q^2_{10} — режим воспроизведения с информативностью 800 изм/с после записи с информативностью 800 изм/с (В8 (от ЗАП8))	0 0 1 1 0 1 1 0
q^2_{11} — режим воспроизведения с информативностью 800 изм/с после совмещенного режима ЗАП32+НП32 (В8(от НП32+ЗАП32))	0 1 1 0 0 1 1 0
q^2_{12} — режим воспроизведения с информативностью 800 изм/с после совмещенного режима НП8+ЗАП8 (В8 (от НП8+ЗАП8))	0 1 1 1 0 1 1 0
q^2_{13} — технологический режим НП по низкой частоте (НП-НЧ (после ЗАП32))	0 0 0 0 0 0 1 0
q^2_{14} — технологический режим после воспроизведения с информативностью 800 изм/с (Нулевой режим (после В8))	0 0 0 0 0 1 1 0
q^2_{15} — технологический режим после воспроизведения с информативностью 3200 изм/с (Нулевой режим (после В32))	0 0 0 0 0 1 0 1

Граф переходов для логической подсистемы центрального блока представлен на рисунке 2.

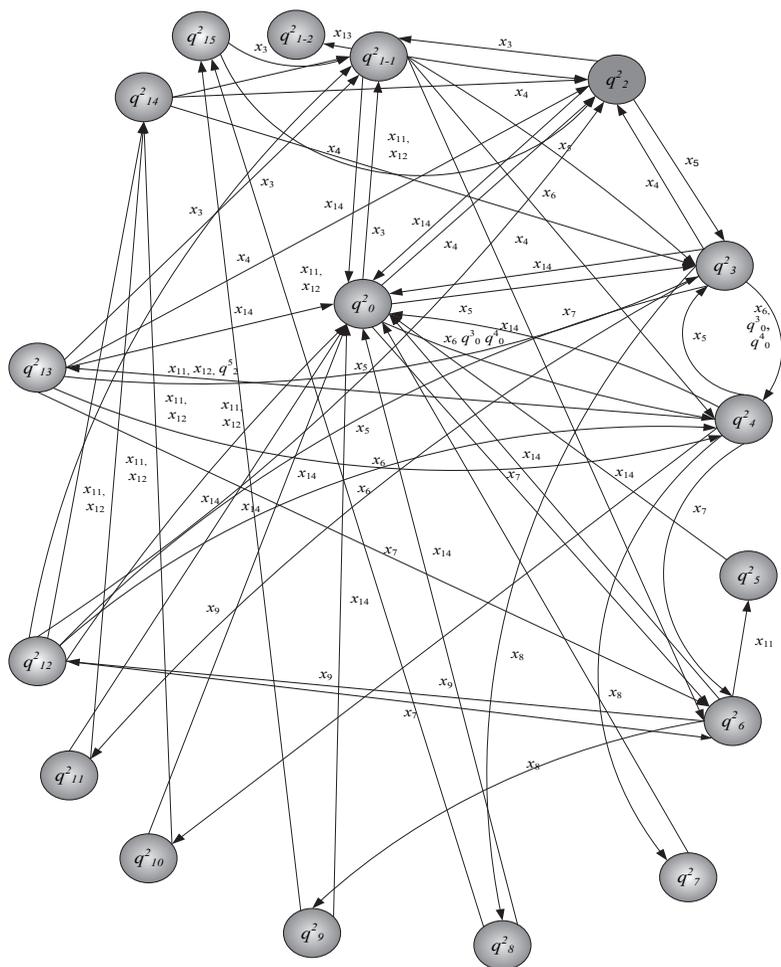


Рис. 2. Граф переходов конечно-автоматной модели логической подсистемы центрального блока

Рассмотрим возможность синтеза минимальной формы конечного автомата на примере режимов функционирования ЛПС₂ БРТС БР-9ЦК-1:

1. По смысловому содержанию и в соответствии с технической документацией все 15 режимов, представленных в таблице 2, можно

разделить на 6 классов, а именно: класс режимов «непосредственная передача информации» — S_1 , класс «непосредственная передача и запись информации» — S_2 , класс «воспроизведения информации» — S_3 , класс «запись информации» — S_4 и класс «технологические режимы» — S_5 . Отдельным классом выделим «дежурный режим» или «режим ожидания команды» — S_0 . Данный режим реализуется после подачи питания на БРТС, при этом начальные установки следующие: питание приборов системы и передатчиков выключено, ЗУ находится в режиме «СТОП». Переход в дежурный режим осуществляется также после подачи команды «x14», при этом происходит сброс текущих установок и выключение питания приборов.

2. В общем виде бинарную последовательность командно-служебного слова можно представить в полиномиальном виде:

$$p_{si}(y) = h_j y^j \oplus \dots \oplus h_2 y^2 \oplus h_1 y^1 \oplus h_0, \quad (18)$$

где $h_j \in \{0,1\}$ — значение j -го разряда КСС, $j = \overline{1, n}$

Из анализа структуры КСС (таблица 3) можно сделать вывод, что для каждой группы режимов существуют разряды, значения которых являются одинаковыми для всего рассматриваемого класса.

Таблица 3. Структура КСС БРТС БР-9ЦК-1

№	Режим	КСС							
		y^7	y^6	y^5	y^4	y^3	y^2	y^1	y^0
1	НП 256	0	1	0	0	0	0	1	1
2	НП32	0	1	0	0	0	0	0	1
3	НП8	0	1	0	0	0	0	1	0
4	НП32+ЗАП 32	0	1	1	0	0	0	0	1
5	НП8+ЗАП8	0	1	1	1	0	0	1	0
6	В32 (от ЗАП8)	0	0	1	1	0	1	0	1
7	В32(от НП32+ЗАП32)	0	1	1	0	0	1	0	1
8	В32(от НП8+ЗАП8)	0	1	1	1	0	1	0	1
9	В8 (от ЗАП8)	0	0	1	1	0	1	1	0
10	В8(от НП32+ЗАП32)	0	1	1	0	0	1	1	0
11	В8 (от НП8+ЗАП8)	0	1	1	1	0	1	1	0
12	ЗАП8	0	0	1	1	0	0	1	0
13	НП-НЧ	0	0	0	0	0	1	0	0
14	Нулевой режим (В8)	0	0	0	0	0	1	1	0
15	Нулевой режим (В32)	0	0	0	0	0	1	0	1

Так, например, для режимов «непосредственная передача информации» общим будет 7-й разряд КСС, значение которого должно быть «1». Таким образом, выражение (18) с учетом отображения (16) будет равно [26]:

$$P_{s1} = y^6,$$

При наличии «1» в 7 и 6 разрядах можно сделать вывод о работе БРТС в одном из режимов класса «непосредственная передача и запись информации»:

$$p_{s2} = y^6 \oplus y^5.$$

Для режима «воспроизведения информации» наличие «1» в 6 и 3 разрядах соответственно будет сигнализировать о соответствующем классе.

3. Относительно данных отличительных разрядов можно говорить об эквивалентности рассматриваемых классов, что, в свою очередь, дает возможность синтезировать минимальную форму конечного автомата в соответствии с выражением (9) [26]. В таблице 4 представлены общие разряды для эквивалентных режимов.

Таблица 4. Эквивалентные классы логической подсистемы центрального блока

№	Режим	КСС							
		y^7	y^6	y^5	y^4	y^3	y^2	y^1	y^0
1.	s_0 (ДЕЖ. РЕЖИМ)	0	0	0	0	0	0	0	0
2.	s_1 (НП)	0	1	0	0	0	0	0	0
3.	s_2 (НП+ЗАП)	0	1	1	0	0	0	0	0
4.	s_3 (ВОСПР)	0	0	1	0	0	1	0	0
5.	s_4 (ЗАП)	0	0	1	0	0	0	0	0
6.	s_5 (ТЕХ. РЕЖИМ)	0	0	0	0	0	1	0	0

На рисунке 3 представлена минимальная форма конечного автомата логической подсистемы центрального блока БР-9ЦК-1 в соответствии с выделенными классами эквивалентности. Петлевые дуги в данной модели не обозначены.

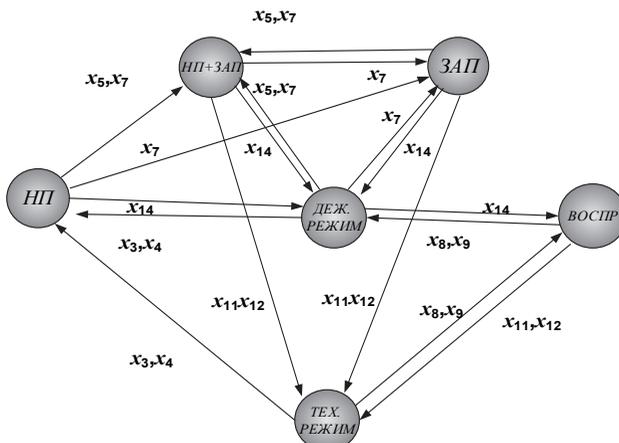


Рис. 3. Минимальная форма конечно-автоматной модели ЛПС центрального блока БИТС БР-9ЦК-1

Таким образом, представленный подход позволил сократить количество состояний с 15 до 6, то есть в 2,5 раза. Созданные на основе данного подхода алгоритмы контроля могут быть использованы при решении задач идентификации и технического диагностирования в условиях автономного функционирования, когда объект контроля обладает обширным спектром ресурсных ограничений (временных, энергетических).

3.2. Оценка эффективности применения адаптивных математических моделей сложных систем при решении задачи контроля и технического диагностирования. Оценку эффективности применения адаптивных математических моделей по показателю «оперативность» произведем через вычислительную сложность алгоритмов проверки исправности БС КА на основе синтезированных моделей. Известно [22], что под вычислительной сложностью алгоритма (задачи) понимается функция $S(n)$, сопоставляющая каждому набору исходных данных n некоторое абстрактное время его вычисления (решения задачи). Очевидно, что реальное время вычисления по алгоритму зависит от типа вычислительного устройства, способа программирования и профессионализма программиста. Однако учет всех этих факторов можно осуществить с помощью введения соответствующего коэффициента пропорциональности.

Для получения временных оценок алгоритма, инвариантного к типу вычислителя, часто вводят понятие элементарной операции (сложение, умножение, пересылка «регистр-регистр»). В этом случае время вычисления по алгоритму может быть оценено функцией $O(n)$, которая определяет число элементарных операций в зависимости от объема исходных данных n . Применительно к данной статье под объемом исходных данных n следует понимать мощность множества (количество) состояний исходной конечно-автоматной модели или модели с минимальным числом состояний.

Построение функции $O(n)$ позволяет в дальнейшем оценивать реальное время выполнения алгоритма для конкретного вычислителя путем умножения количества элементарных операций на время выполнения отдельной операции.

Как было отмечено ранее, проверка исправности БА, процесс функционирования которой формализован при помощи математического аппарата конечных автоматов, производится при помощи отработки программы контрольных испытаний, задающей обход всех переходов КАМ. В общем случае задача оптимального обхода всех переходов графа получила название задачи «китайского

почтальона» — нахождения кратчайшего пути обхода всех дуг графа неэйлеровой модели [22]. В свою очередь, решение задачи «китайского почтальона» подразумевает реализацию алгоритма Дейкстры с целью построения кратчайших путей и реализацию алгоритма Флери, осуществляющих эйлеров обход синтезированной модели. В качестве элементарной операции выступает сравнение двух символов (или слов), время выполнения которой примем $\Delta t_s = 1$ мкс.

Отсюда верхнюю оценку $\overline{S(n)}$ вычислительной сложности алгоритма решения задачи «китайского почтальона» можно представить как произведение верхних оценок вычислительных сложностей алгоритмов Дейкстры и Флери [33, 34]:

$$\overline{S(n)} = O(n^2) * O(n^2) = O(n^4). \quad (19)$$

Применительно к синтезу адаптивной модели БРТС, верхняя оценка вычислительной сложности t^e от количества состояний n для $\Delta t_s = 1$ мкс представлена в таблице 5.

Таблица 5. Верхняя оценка вычислительной сложности алгоритма «китайского почтальона»

n	t^e, c
5	0,08
6	0,3
7	0,8
8	2,1
9	4,8
10	10
11	19,5
12	36
13	62,7
14	105,4
15	170,9
16	268,4
17	410,3

При определении общего времени контроля бортовых систем КА, кроме времени подачи и реализации тестовых (управляющих) воздействий (команд), измерения и оценки контрольных (телеметрируемых) параметров (выходных переменных), необходимо также учитывать время

подготовительных (t_n) и заключительных (t_3) операций при контроле. Отсюда общее время контроля [35]:

$$T_k = t_n + t_3 + t.^{\sigma} \quad (20)$$

Согласно технической документации, на подготовительные и заключительные операции ($t_n + t_3$) при проведении наземных контрольных испытаний БИТС БР-9ЦК-1 отводится до 25 минут, при проведении бортовых контрольных испытаний БИТС БР-9ЦК-1 до 1,5 минут [32, 34].

Общее время контроля при применении конечно-автоматных моделей подсистем БИТС БР-9ЦК-1с различным числом состояний при проведении наземных (T_{kn}) наземных и бортовых (T_{kb}) контрольных испытаний с учетом выражения (23) для $\Delta t_j = 1$ мкс представлены в таблице 6.

Таблица 6. Общее время контроля подсистем БИТС БР-9ЦК-1

n	T_{kn}, c	T_{kb}, c
5	≈1500	90,08
6	1500,3	90,3
7	1500,8	90,8
8	1502,1	92,1
9	1504,8	94,8
10	1510	100
11	1519,5	109,5
12	1536	126
13	1562,7	152,7
14	1605,4	195,4
15	1670,9	260,9
16	1768,4	358,4
17	1910,3	500,3

Анализ полученных результатов показывает, что применение разработанной адаптивной математической модели вида (10), с учетом отображения (2), при решении задачи контроля технического состояния БИТС БР-9ЦК-1 позволяет получить существенный выигрыш (на 15-20% при проведении наземных контрольных испытаний и в 2-3 раза при проведении бортовых контрольных испытаний БИТС БР-9ЦК-1) по показателю оперативности. Однако здесь следует обращать внимание на вопросы обеспечения требуемой достоверности контроля применительно к решаемой целевой задаче. Для приведенного конкретного примера скорость передачи информации (информативность) для различных режимов работы БРТС оказалась несущественной, достаточно было при определении вида ТС

идентифицировать сам режим. Это позволило перейти к обобщенным диагностическим признакам и тем самым уменьшить мощность множества состояний Q исходной модели практически без потери в достоверности контроля.

В тоже время, задача поиска места и определение причин отказа (неисправности), как правило, решается путем проведения программы диагностических испытаний для полной конечно-автоматной модели с фиксированным классом неисправностей, обнаруживаемых в рамках используемой модели. В данном случае показателем оптимизации обычно выступает достоверность, зависящая от размерности математической модели и ее адекватности в рамках решаемой конкретной задачи.

4. Заключение. Предложенный подход синтеза адаптивных моделей заключается в преобразовании модели процесса функционирования бортовой радиоэлектронной аппаратуры в гомологичную структуру меньшей размерности. Модель процесса функционирования основана на использовании математического аппарата конечных автоматов. Новизна подхода заключается в том, что гомологичная структура меньшей размерности синтезирована за счет преобразования отношений между элементами множества телеметрируемых (контролируемых) параметров (выходных переменных конечно-автоматной модели). При этом преобразование модели осуществляется по критерию максимума выбранного показателя качества — оперативности контроля.

Проведенный анализ вычислительной сложности алгоритма контроля центрального блока БРТС БР-9ЦК-1 показал, что применение моделей, преобразованных в гомологичную структуру меньшей размерности, для решения задачи контроля ТС позволяет получить существенный выигрыш по показателю оперативности (от 15-20% до 2-3 раз в зависимости от места проведения контрольных испытаний). Ограничением в данном случае выступает требуемая достоверность контроля.

Литература

1. *Лоскутов А.И., Клыков В.А.* Идентификация и техническое диагностирование бортовой аппаратуры автономных космических аппаратов на основе биективного преобразования множества диагностических признаков // Контроль. Диагностика. 2016. № 4. С. 57–63.
2. *Мышко В.В., Кравцо А.Н., Копкин Е.В., Чижуров А.В.* Теоретические основы и методы оптимизации анализа технического состояния сложных систем // СПб: ВКА имени А.Ф. Можайского. 2013. 303 с.
3. *Дмитриев А.К., Юсупов Р.М.* Идентификация и техническая диагностика // МО СССР. 1987. 525 с.
4. *Ambrose R. et al.* NASA technology roadmaps: TA 4: Robotics and autonomous systems // Technical report. NASA. 2015. pp. 50–58.

5. *Zotes F., Penas M.* Intelligent satellites control based on fuzzy logic in the Earth Moon Libration points // International Conference on Intelligent Systems and Knowledge Engineering (ISKE). 2010. pp. 605–610.
6. *Codetta-Raiteri D., Portinale L., Nolfo S., Guiotto A.* ARPHA: a software prototype for fault detection, identification and recovery in autonomous spacecrafts // Acta Futura. 2012. vol. 5. pp. 99–110.
7. *Wander A., Förstner R.* Innovative fault detection, isolation and recovery strategies on-board spacecraft: state of the art and research challenges // Deutscher Luft- und Raumfahrtkongress. 2012. pp. 1–9.
8. *Meskin N., Khorasani K.* Fault detection and isolation: Multi-vehicle unmanned systems // New York: Springer. 2011. 166 p.
9. *Schumann J., Mengshoel O., Mbaya T.* Integrated Software and Sensor Health Management for Small // IEEE Fourth International Conference on Space Mission Challenges for Information Technology (SMC-IT). 2011. pp. 77–84.
10. *Резников Б.А.* Системный анализ и методы системотехники. Часть 1. Методология системных исследований. Моделирование сложных систем // Л.: МО СССР. 1990. 524 с.
11. *Калинин В.Н.* Теоретические основы системных исследований. Краткий авторский курс // СПб: ВКА им А.Ф. Можайского. 2013. 278 с.
12. ГОСТ 20911-89. Техническая диагностика. Термины и определения // М.: Изд-во стандартов. 1990. 12 с.
13. *Дунаев В.В. Поляков О.М., Фролов В.В.* Алгоритмические основы испытаний // Л.: МО СССР. 1991. 429 с.
14. *Копкин Е.В., Бородько Д.Н., Пастухова К.С.* Алгоритм построения квазиоптимальной гибкой программы анализа технического состояния объекта // Информационно-управляющие системы. 2017. № 1. С. 27–41.
15. *Копкин Е.В., Кобзарев И.М., Зверева Е.В.* Квазиоптимальный алгоритм построения гибкой программы анализа технического состояния объекта // Научные технологии в космических исследованиях земли. 2017. № 3. С. 4–12.
16. *Копкин Е.В., Чукуров В.А., Алейник В.В., Лазутин О.Г.* Алгоритм построения гибкой программы диагностирования технического объекта по критерию ценности получаемой информации // Труды СПИИРАН. 2015. № 4(41). С. 106–128.
17. *Копкин Е.В., Кравцов А.Н., Лазутин О.Г.* Выбор дискретных диагностических признаков с учетом их ценности для распознавания технического состояния объекта // Информация и космос. 2015. № 2. С. 111–117.
18. *Полянский В.И.* Нечеткие множества в моделях и методах диагностирования сложных технических систем: монография // М.: Полиграф сервис. 2010. 242 с.
19. *Патраков С.С., Лоскутов А.И., Фомин А.В.* Модель интеллектуальной системы управления испытаниями объектов ракетно-космической техники // Сборник тезисов докладов НТК «КБ Арсенал». 2017. С. 47–51.
20. *Лоскутов А.И., Вечерков В.Б., Шестопалова О.Л.* Автоматизация контроля состояния сложных технических систем на основе использования конечно-автоматной модели и нейросетевых структур // Информационно-измерительные системы. 2012. № 2. С. 74–81.
21. *Козырев Г.И., Лоскутов А.И., Хаматов А.А.* Конечно-автоматная модель функционирования бортовой аппаратуры автономных космических аппаратов для контроля технического состояния с использованием нечеткой логики // Труды ВКА им. А.Ф. Можайского. 2016. Вып. 651. С. 28–39.
22. *Лоскутов А.И., Козырев Г.И.* Основы испытаний бортовых радиоэлектронных систем // СПб: ВКА им А.Ф. Можайского. 2013. 158 с.
23. *Гончаренко В.А., Грызунов В.В.* Теория автоматов. Курс лекций // СПб: ВКА им. А.Ф. Можайского. 2014. 182 с.
24. *Горбатов В.А., Горбатов А.В., Горбатова М.В.* Теория автоматов: учебник для студентов вузов // М.: АСТ: Астрель. 2008. 559 с.

25. *Кудрявцев В.Б., Алешин С.В., Подколзин А.С.* Теория автоматов: учебник для бакалавриата и магистратуры // М. Юрайт. 2017. 320 с.
26. *Лоскутов А.И., Клыков В.А.* Синтез минимальной формы конечно-автоматной модели функционирования бортовых радиоэлектронных систем космических аппаратов по обобщенным диагностическим признакам // Измерение. Мониторинг. Управление. 2016. № 4. С.85–95.
27. *Дунаев В.В.* Занимательная математика. Множества и отношения // СПб: БХВ-Петербург. 2008. 336 с.
28. *Дунаев, В.В.* Классификационные основы теории испытаний // Л.: МО СССР. 1984. 145 с.
29. *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.
30. *Телеметрические системы разгонного блока «Фрегат» // ФГУП НПО им. С.А. Лавочкина. 2007. 127 с.*
31. 14С44 ДПМ ч. 1. Программа телеметрических измерений. Ч.1. Измерения системы БР-9ЦК-1. ФГУП НПО им. С.А. Лавочкина. 2007. 32 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.
33. *Кормен Т., Лейзерсон Ч., Ривест Р.* Алгоритмы: построение и анализ // М.: МЦНМО. 2001. 960 с.
34. *Дольников В.Л. Якимов О.П.* Основные алгоритмы на графах: текст лекций // Ярославль: ЯрГУ. 2011. 80 с.
35. *Кочелаев Ю.С.* Автоматизированные испытательные комплексы. Выпуск 3. Оптимизация алгоритмов автоматизированного тестового контроля: учебное пособие // СПб.: МО РФ. 1992. 118 с.

Лоскутов Андрей Иванович — д-р техн. наук, доцент, начальник кафедры телеметрических систем и комплексной обработки информации, Военно-космическая академия имени А.Ф. Можайского (ВКА им. А.Ф. Можайского). Область научных интересов: телеметрия, защита информации, идентификация, контроль и диагностика сложных технических систем, искусственный интеллект. Число научных публикаций — 72. rujenz@mail.ru; Ждановская, 13, Санкт-Петербург, 197198; р.т.: +7(812)235-95-34.

Козырев Геннадий Иванович — д-р техн. наук, профессор, профессор кафедры телеметрических систем и комплексной обработки информации, Военно-космическая академия имени А.Ф. Можайского (ВКА им. А.Ф. Можайского). Область научных интересов: защита информации, идентификация, контроль и диагностика сложных технических систем, методы повышения точности измерений. Число научных публикаций — 141. genkozyrev@yandex.ru; Ждановская, 13, Санкт-Петербург, 197198; р.т.: +7(812)235-95-34.

Клыков Владимир Алексеевич — адъюнкт кафедры телеметрических систем и комплексной обработки информации, Военно-космическая академия имени А.Ф. Можайского (ВКА им. А.Ф. Можайского). Область научных интересов: идентификация, контроль и диагностика сложных технических систем. Число научных публикаций — 16. v.klikoff86@mail.ru; Ждановская, 13, Санкт-Петербург, 197198; р.т.: +7(812)235-95-34.

Шестопалова Ольга Львовна — к-т техн. наук, доцент, декан факультета испытания летательных аппаратов филиала «Восход», Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет) (МАИ). Область научных интересов: методы повышения надежности и безопасности ракетно-космической техники, методы управления развитием сложных территориально-распределенных комплексов. Число научных публикаций — 159. neman2004@mail.ru; пр. Гагарина, 5, Байконур, Кызыл-Ординская обл., 468320, Казахстан; р.т.: +7(33622)5-15-22.

**A.I. LOSKUTOV, G.I. KOZYREV, V.A. KLYKOV, O.L. SHESTOPALOVA
SYNTHESIS OF ADAPTIVE MATHEMATICAL MODELS OF
ONBOARD ELECTRONIC SYSTEMS OF THE SPACECRAFT
THROUGH THE APPLICATION OF MATHEMATICAL
HOMOLOGOUS STRUCTURES**

Loskutov A.I., Kozyrev G.I., Klykov V.A., Shestopalova O.L. **Synthesis of Adaptive Mathematical Models of Onboard Electronic Systems of the Spacecraft Through the Application of Mathematical Homologous Structures.**

Abstract. The article discusses the issues of the synthesis of adaptive mathematical models applied to the problems of technical diagnostics of on-board electronic systems of the spacecraft. The authors formulated the problem of the synthesis of adaptive models of on-board radio-electronic systems of spacecraft in a general form using the transformation of the source mathematical structure into the homologous structure with smaller dimension. An approach to the synthesis of adaptive models on the basis of using mathematical apparatus of finite state machines is presented. The novelty of the approach lies in the fact that a homologous structure with smaller dimension is synthesized by transformation of the relations between the elements of a set of controlled parameters (output variables of FSM model). An example of the synthesis of the mathematical model of the on-board telemetry system's central unit, adaptive to the control process of technical condition, is given. Efficiency of the synthesized adaptive model of on-board radio-electronic systems was evaluated by solving the Chinese postman problem.

Keywords: technical diagnostics, control, onboard equipment, spacecraft, mathematical model, finite state machine.

Loskutov Andrey Ivanovich — Ph.D., Dr. Sci., associate professor, head of telemetric systems and complex information processing department, Mozhaisky Military Space Academy. Research interests: telemetry, protection, identification, control and diagnosis of complex technical systems, artificial intelligence. The number of publications — 72. rujenz@mail.ru; 13, Zhdanovskaya street, St.-Petersburg, 197198, Russia; office phone: +7(812)235-95-34.

Kozyrev Gennadij Ivanovich — Ph.D., Dr. Sci., professor, professor of telemetric systems and complex information processing department, Mozhaisky Military Space Academy. Research interests: telemetry, protection, identification, control and diagnosis of complex technical systems, methods of increase of accuracy of measurements. The number of publications — 141. gen-kozyrev@yandex.ru; 13, Zhdanovskaya street, St.-Petersburg, 197198, Russia; office phone: +7(812)235-95-34.

Klykov Vladimir Alekseevich — Ph.D. student of telemetric systems and complex information processing department, Mozhaisky Military Space Academy. Research interests: identification, control and diagnosis of complex technical systems. The number of publications — 16. v.klikoff86@mail.ru; 13, Zhdanovskaya street, St.-Petersburg, 197198, Russia; office phone: +7(812)235-95-34.

Shestopalova Olga L'vovna — Ph.D., associate professor, dean of test of aircraft faculty of "Sunrise" branch, Moscow Aviation Institute (MAI). Research interests: methods to improve the reliability and safety of rocket and space technology, management methods development of complex geographically distributed systems. The number of publications — 159. neman2004@mail.ru; 5, Gagarina pr., Baikonur, 468320, Kazakhstan; office phone: +7(33622)5-15-22.

References

1. Loskutov A.I., Klykov V.A. [Identification and technical diagnostics of onboard equipment of Autonomous spacecraft based on bijective transformations of the set of diagnostic features]. *Kontrol'. Diagnostika – Testing, Diagnostics*. 2016. vol. 4. pp. 57–63. (In Russ.).

2. Myshko V.V., Kravtsov A.N., Kopkin E.V., Chikurov A.V. *Teoreticheskie osnovy i metody optimizatsii analiza tekhnicheskogo sostoyaniya slozhnykh sistem* [Theoretical bases and methods of optimization of the analysis of technical condition of difficult systems]. SPb: VKA imeni A.F. Mozhajskogo. 2013. 303 p. (In Russ.).
3. Dmitriev A.K., Yusupov R.M. *Identifikatsiya i tekhnicheskaya diagnostika* [Identification and technical diagnostics]. MO SSSR. 1987. 525 p. (In Russ.).
4. Ambrose R. et al. NASA technology roadmaps: TA 4: Robotics and autonomous systems. Technical report. NASA. 2015. 2015. pp. 50–58.
5. Zotes F., Penas M. Intelligent satellites control based on fuzzy logic in the Earth Moon Libration points International Conference on Intelligent Systems and Knowledge Engineering (ISKE). 2010. pp. 605–610.
6. Codetta-Raiteri D., Portinale L., Nolfo S., Guiotto A. ARPHA: a software prototype for fault detection, identification and recovery in autonomous spacecrafts. *Acta Futura*. 2012. vol. 5. pp. 99–110.
7. Wander A., Förstner R. Innovative fault detection, isolation and recovery strategies on-board spacecraft: state of the art and research challenges. Deutscher Luft- und Raumfahrtkongress. 2012. pp. 1–9.
8. Meskin N., Khorasani K. Fault detection and isolation: Multi-vehicle unmanned systems. New York: Springer. 2011. 166 p.
9. Schumann J., Mengshoel O., Mbaya T. Integrated Software and Sensor Health Management for Small. IEEE Fourth International Conference on Space Mission Challenges for Information Technology (SMC-IT). 2011. pp. 77–84.
10. Reznikov B.A. *Sistemnyy analiz i metody sistemotekhniki. CHast' 1. Metodologiya sistemnykh issledovaniy. Modelirovanie slozhnykh sistem* [System analysis and methods of systems engineering. Part 1. The methodology of system research. Modeling of complex systems]. L.: MD. 1990. 524 p. (In Russ.).
11. Kalinin V.N. *Teoreticheskie osnovy sistemnykh issledovaniy. Kratkij avtorskiy kurs* [The theoretical basis of system studies. A short author's course]. SPb: VKA imeni A.F. Mozhajskogo. 2013. 278 p. (In Russ.).
12. *GOST 20911-89. Tehnicheskaya diagnostika. Terminy i opredeleniya* [State Standard 20911-89. Technical diagnostics. Terms and definitions]. M. Standarty. 1991. 12 p. (In Russ.).
13. Dunaev V.V., Polyakov O.M., Frolov V.V. *Algoritmicheskie osnovy ispitaniy* [Algorithmic foundations of testing]. L.: MO SSSR. 1991. 429 p. (In Russ.).
14. Kopkin E.V., Borodko D.N., Pastuhova K.S. [The algorithm for constructing quasi-optimal flexible program of analysis of the technical state of the object]. *Informatsionno-upravliaiushchie sistemy – Information and Control Systems*. 2017. vol. 1. pp. 27–41. (In Russ.).
15. Kopkin E.V., Kobzarev I.M., Zvereva E.V. [Quasi-optimal algorithm for a flexible program of analysis of the technical state of the object]. *Hi-tech earth space research – Naukoemkie tehnologii v kosmicheskikh issledovaniyakh zemli*. 2017. vol. 3. pp. 4–12. (In Russ.).
16. Kopkin E.V., Chikurov V.A., Aleinik V.V., Lazutin O.G. [The algorithm for constructing a flexible program of diagnosing a technical object according to the criterion of the value of the received information]. *Trudy SPIIRAN – SPIIRAS Proceedings*. 2015. vol. 4(41). pp. 106–128. (In Russ.).
17. Kopkin E.V., Kravcov A.N., Lazutin O.G. [The choice of discrete diagnostic characters based on their value for recognition of a technical condition of object]. *Informatsiya i kosmos – Information and Space*. 2015. vol. 2. pp. 111–117. (In Russ.).
18. Polyanskii V.I. *Nechetkie mnojestva v modelyakh i metodakh diagnostirovaniya slozhnykh tekhnicheskikh sistem: monografiya* [Fuzzy sets in models and methods of diagnosis of complex technical systems: monograph]. M. Poligraf servis. 2010. 242 p. (In Russ.).

19. Patrakov S.S., Loskutov A.I., Fomin A.V. [The model of intellectual control system testing of space hardware]. *Sbornik tezisev dokladov NTK «KB Arsenal»* [The book of abstracts and reports of NTK «KB Arsenal»]. 2017. pp. 47–51. (In Russ.).
20. Loskutov A.I., Vecherkin V.B., Shestopalova O.L. [Automating condition monitoring of complex technical systems based on the use of finite-automaton model and neural network structures]. *Informatsionno-upravliaiushchie sistemy – Information and Control Systems*. 2012. vol. 2. pp. 74–81. (In Russ.).
21. Kozirev G.I., Loskutov A.I., Hamatov A.A. [Finite-automaton model of functioning of onboard equipment of Autonomous spacecraft for control of technical condition using fuzzy logic]. *Proceedings of the Mozhaisky Military Space Academy*. 2016. vol. 651. pp. 28–39. (In Russ.).
22. Loskutov A.I., Kozirev G.I. *Osnovy ispytaniy bortovyykh radioelektronnykh sistem* [Bases of tests of onboard radio-electronic systems]. SPb: VKA imeni A.F. Mozhajskogo. 2013. 158 p. (In Russ.).
23. Goncharenko V.A. *Teoriya avtomatov. Kurs lektsij* [Automata theory. A course of lectures]. SPb: VKA imeni A.F. Mozhajskogo. 2014. 182 p. (In Russ.).
24. Gorbatov V.A. *Teoriya avtomatov: uchebnyk dlya studentov vtuzov* [Automata theory: textbook for students of technical colleges]. M.: AST: Astrel. 2008. 559 p. (In Russ.).
25. Kudryavcev V.B., Aleshin S.V., Podkolzin A.S. *Teoriya avtomatov: uchebnyk dlya bakalavriata i magistraturi* [Automata theory: textbook for undergraduate and graduate]. M. Yurait. 2017. 320 p. (In Russ.).
26. Loskutov A.I. Klykov V.A. [Synthesis of minimal forms of finite-automaton model of functioning of onboard electronic systems of space vehicles according to the diagnostic criteria]. *Izmerenie. Monitoring. Upravlenie – Dimension. Monitoring. Management*. 2016. vol. 4. pp. 85–95. (In Russ.).
27. Dunaev V.V. *Zanimatel'naya matematika. Mnozhestva i otnosheniya* [Entertaining mathematics. Sets and relations]. St. Petersburg: BHV-Peterburg. 2008. 336 p. (In Russ.).
28. Dunaev V.V. *Klassifikatsionnye osnovy teorii ispytaniy* [Classification of the basic theory test]. L.: MO SSSR. 1984. 145 p. (In Russ.).
29. Loskutov A.I. Klykov V.A. [The technique of synthesis of mathematical model of functioning of onboard systems of the rocket and space technology on the basis of logical decomposition]. *Pribory i sistemy. Upravlenie, kontrol', diagnostika – Instruments and Systems: Monitoring, Control, and Diagnostics*. 2016. vol. 5. pp. 7–18. (In Russ.).
30. *Telemetricheskie sistemy razgonnogo bloka «Fregat»* [The telemetry system of the upper stage "Fregat"]. FGUP NPO im. S.A. Lavochkina. 2007. 127 p. (In Russ.).
31. *14S44 DPM ch.1. Programma telemetricheskikh izmerenij. CH.1. Izmereniya sistemy BR-9CK-1* [14S44 DPM p.1. Program telemetry measurements. Part 1. Measurement system]. FGUP NPO im. S.A. Lavochkina. 2007. 32 p. (In Russ.).
32. *14S44 IE20 ch.1 – Izdelie 14S44. Instrukciya po ocenke raboty bortovykh sistem. Ocenka raboty sistemy BR-9CK-1. Chast' 1* [14S44 IE20 ch.1 – Product 14S44. Manual of on-Board systems. The performance evaluation system]. FGUP NPO im. S.A. Lavochkina. 2007. 21 p. (In Russ.).
33. Kormen T., Leizerson Ch., Rivest R. *Algoritmi postroenie i analiz* [Algorithms: construction and analysis]. M. MCNMO. 2001. 960 p. (In Russ.).
34. Dolnikov V.L. Yakimova O.P. *Osnovnye algoritmi na grafhah: tekst lektsii* [Basic algorithms on graphs: text of the lectures]. Yaroslavl. YarGU. 2011. 80 p. (In Russ.).
35. Kochelaev Y.S. *Avtomatizirovannye ispitatelnye kompleksi. Vypusk 3. Optimizatsiya algoritmov avtomatizirovannogo testovogo kontrolya: uchebnoe posobie* [Automated test complexes. Volume 3. Optimization of algorithms for automated test control: tutorial]. SPb.: MO RF. 1992. 118 p. (In Russ.).