

УДК 681.3

В. А. Лоскутов, В. А. Клыков, О. Л. Шестопалова

**СИНТЕЗ МИНИМАЛЬНОЙ ФОРМЫ
КОНЕЧНО-АВТОМАТНОЙ МОДЕЛИ
ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ БОРТОВЫХ
РАДИОЭЛЕКТРОННЫХ СИСТЕМ
КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ ПО ОБОБЩЕННЫМ
ДИАГНОСТИЧЕСКИМ ПРИЗНАКАМ**

V. A. Loskutov, V. A. Klykov, O. L. Shestopalova

**SYNTHESIS OF MINIMAL FORMS OF FINITE-AUTOMATON
MODEL OF FUNCTIONING OF ONBOARD ELECTRONIC
SYSTEMS OF SPACE VEHICLES ACCORDING
TO THE DIAGNOSTIC CRITERIA**

А н н о т а ц и я. Актуальность и цели. Объектом исследования является бортовая радиотелеметрическая система (БРТС) космического аппарата (КА). Предметом исследования являются процессы идентификации и технического диагностирования бортовой аппаратуры автономных космических аппаратов. Целью работы является разработка способов оптимизации алгоритмов контроля бортовой аппаратуры (БА) космических аппаратов за счет семантического анализа телеметрической информации и нахождения обобщенных диагностических признаков. *Материалы и методы.* В качестве БРТС рассмотрена система БР-9ЦК-1, используемая на современных объектах ракетно-космической техники. В качестве математической модели для отдельных логических подсистем, описывающих основные режимы работы БРТС БР-9ЦК-1, выбран конечный автомат Мура. Введено понятие семантически обобщенного признака, позволяющего минимизировать количество состояний конечного автомата, а также синтезировать минимальную форму конечно-автоматной модели. *Результаты.* Осуществлена постановка задачи синтеза минимальной формы конечно-автоматной модели функционирования БА КА для разработки алгоритмов контроля. Представлена методика синтеза минимальной формы конечного автомата по обобщенному диагностическому признаку. Приведен пример синтеза минимальной формы конечно-автоматной модели функционирования БА КА. *Выводы.* Представленная методика синтеза минимальной формы конечно-автоматной модели БА КА показывает возможность синтеза оптимизированных алгоритмов контроля по обобщенным диагностическим признакам, которые могут быть применены в автоматических бортовых системах диагностирования автономных космических аппаратов.

A b s t r a c t. Background. The object of the research is on-board radio telemetry system of the spacecraft. The subject of research is the process of identification and diagnosis of on-board equipment of autonomous spacecraft. The aim is to develop ways to optimize onboard equipment control algorithms for spacecraft by semantic analysis of telemetry data and finding the generalized diagnostic features. *Materials and methods.* As an on-board system reviewed system

BP-9ЦК-1 used in the modern facilities of rocket and space technology. As a mathematical model for the individual logic subsystems describing the basic operation of the BP-9ЦК-1, the state machine of Moore selected system. The concept of a generalized semantic feature, which allows to minimize the number of states of a finite state machine, as well as to synthesize a minimal form of finite automaton model. *Results.* Has staged synthesis problem minimal form finite automaton model of the functioning of on-board unit for the development of control algorithms. A procedure for the synthesis of minimal form of a finite automaton by the generalized diagnostic features. An example of the synthesis of the minimum forms of finite automaton model KA BA operation. *Conclusions.* The presented method of synthesis of the minimum forms of finite automaton model of the onboard spacecraft equipment, shows the possibility of the synthesis of optimized control algorithms for generalized diagnostic features that can be used in automated systems onboard diagnostics autonomous spacecraft.

К л ю ч е в ы е с л о в а: бортовая аппаратура, конечно-автоматная модель, алгоритм контроля, идентификация, диагностический признак, автономность.

К e y w o r d s: onboard equipment, final and automatic model, algorithm of control, identification, diagnostic sign, autonomy.

Введение

Современный этап развития объектов ракетно-космической техники (РКТ) характеризуется повышением требований к эффективности их функционирования. В свете данных требований увеличение срока активного существования и автономности космических аппаратов является важной задачей, связанной не только с развитием элементной базы, но и с совершенствованием специального математического обеспечения (СМО) функционирования бортовой аппаратуры (БА) космического аппарата (КА), в том числе бортовых систем диагностирования.

Из литературы [1, 2] известно, что основным направлением совершенствования процессов контроля и диагностирования бортовой аппаратуры космических аппаратов с целью повышения автономности их функционирования является передача бортовому контрольно-диагностическому комплексу функции принятия решений о виде технического состояния (ТС) бортовой аппаратуры КА в каждый момент времени до ситуации отказа резервной аппаратуры. Эффективность решения задач идентификации и диагностирования автономной бортовой системой диагностирования зависит от оптимизации алгоритмов контроля. Таким образом, для перспективных КА необходимо разработать и использовать в составе БА автоматическую бортовую систему диагностирования с соответствующим математическим обеспечением для эффективного решения задач идентификации и технического диагностирования БА КА. Под эффективностью подразумевается: во-первых, использование оптимальных алгоритмов контроля при обеспечении максимально возможного уровня достоверности и ресурсоемкости контроля ТС БА КА в рамках выбранной математической модели; во-вторых, минимизация временных затрат как на синтез, так и на применение данных алгоритмов.

Постановка задачи синтеза минимальной формы конечно-автоматной модели для разработки алгоритмов контроля

Из работы [3] известно, что задачами технического диагностирования БА КА являются контроль технического состояния, поиск места и определение причин отказа (неисправности) и прогнозирование технического состояния. Формализованное описание этих задач предполагает наличие математической модели объекта, вид представления которой зависит от свойств объекта, целей контроля и условий его проведения. В этом случае удобным является подход, позволяющий рассматривать объект контроля в виде конечного автомата, достоинствами которого являются развитость их теории, относительная простота и адекватность описания дискретных объектов (во времени и по состояниям), использование для их изучения финитных методов логики и алгебры.

Обычно конечный автомат описывается в виде упорядоченной пятерки [4]:

$$A = \langle X, Y, Q, f, \varphi \rangle, \quad (1)$$

где X – множество входных воздействий (алфавит входных символов); Y – множество выходных переменных (алфавит выходных символов); Q – множество состояний; $f: Q \times X \rightarrow Q$ – функция переходов; $\varphi: Q \times X \rightarrow Y$ – функция выходов для автомата Мили (автомата 1-го рода).

Каждое состояние конечно-автоматной модели характеризуется своим образом $q_i = (y_1, y_2, \dots, y_n)^T$, где $i = \overline{1, n}$ в n -мерном пространстве. Из литературы [5] известно, что одним из направлений оптимизации решения задачи диагностирования является сокращение размерности пространства состояний путем нахождения обобщенных диагностических признаков:

$$h: Y \rightarrow Y^l \Rightarrow Q^l: |Q| \rightarrow \min, |Y^l| < |Y|.$$

В результате чего математическая конструкция (1) примет вид

$$A = \langle X, Y^l, Q^l, f, \varphi \rangle. \quad (2)$$

Известно [6], что под контролем технического состояния, как одной из подзадач технического диагностирования, понимается определение вида технического состояния объекта. В зависимости от этапа эксплуатации и решаемых целевых задач в качестве цели контроля могут рассматриваться проверка функции исправности, работоспособности или правильности функционирования. На стадии изготовления КА бортовая аппаратура проходит наиболее полный контроль как элементов, блоков, систем, так и самого КА в целом, что требует синтеза адекватной математической модели объекта контроля. Однако на стадии эксплуатации КА, особенно в условиях его автономного функционирования, наличие различного рода ресурсных ограничений (временных, энергетических) обуславливает невозможность проведения контроля технического состояния БА в том объеме, что и на стадии изготовления. Минимальным по объему является контроль правильности функционирования БА КА в заданный момент времени 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 синтеза моделей вида (2) как объектов, так процессов контроля, удовлетворяющим требованиям достоверности и оперативности. Одним из направлений выхода из сложившейся ситуации является использование подхода, основанного на семантическом анализе телеметрической информации.

На практике при решении задач контроля технического состояния БА КА рассматривается модель объекта контроля в конечно-автоматной форме (1). Вопрос синтеза модели (2) может быть реализован поиском семантически обобщенного параметра на множестве телеметрируемых параметров $\{y_i\}$, где $i = \overline{1, m}$, и построением минимальной формы конечного автомата за счет вновь образованных классов эквивалентности по обобщенному параметру. Каждому параметру из Y^l необходимо сопоставить класс всех тех телеметрических сообщений $S_k \in Y$, которые могут быть отображены в данный параметр, за счет некоего 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 (рис. 1).

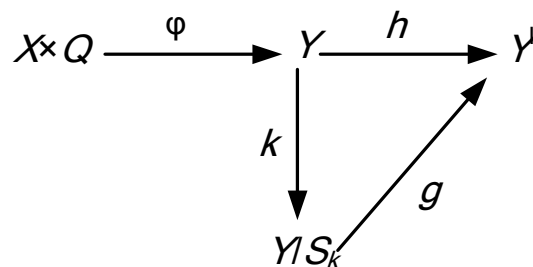


Рис. 1. Коммутативная диаграмма нахождения обобщенных диагностических признаков

Функция выхода представляет собой последовательность отображений φ и h , которые позволяют преобразовывать множества текущих состояний в множество обобщенных параметров Y^l . 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 :

$$\varphi: Q \times X \rightarrow Y. \quad (3)$$

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

$$k: Y \rightarrow Y/S_k. \quad (4)$$

По своему смыслу данное отображение является наложением (сюръекцией) и называется естественным отображением [7].

2. Далее осуществляется определение обобщенных диагностических признаков $y_i^l \in Y^l$, которые будут индивидуальны для каждого класса S_k . Данная операция представляется в виде взаимно-однозначного отображения:

$$g: Y/S_k \rightarrow Y^l. \quad (5)$$

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

$$h = k \circ g. \quad (6)$$

Из литературы [4] известно, что минимизация числа состояний автомата связана с анализом эквивалентности его состояний. Два состояния q_i и q_j эквивалентны, если $\varphi(q_i) = \varphi(q_j)$, т.е. состояния q_i и q_j имеют одинаковые выходные символы. Определение обобщенного диагностического признака по отображению h приведет к образованию классов эквивалентности и соответственно минимизации числа состояний.

Методика синтеза минимальной формы конечного автомата по обобщенному диагностическому признаку

Приведем методику, которая позволяла бы строить минимальную форму конечного автомата по обобщенному диагностическому признаку.

Будем считать, что модель объекта испытаний может быть представлена в виде N -значного автомата A , где N – число телеметрируемых параметров. Вначале определим понятия влияния команд на параметры и параметров на параметры. Команда x влияет на параметр Y_i , если существуют состояния автомата A q , $s \in Q$ такие, что $f(x, q) = s$, причем $\varphi(q[i]) \neq \varphi(s[i])$, т.е. команда x меняет значение i -го параметра.

В работе [8] приведена методика, которая позволяет по неформальному описанию N -значного автомата строить его формальную декомпозицию. Применительно к задаче синтеза минимальной формы конечно-автоматной модели с учетом нахождения обобщенных параметров методика будет выглядеть следующим образом:

1. Определяется множество управляющих воздействий (команд), подаваемых на объект испытаний $x_j \in X$, $j = \overline{1, r}$.

2. Определяется множество выходных переменных (телеметрируемых параметров), позволяющих контролировать работу объекта испытания $y_i \in Y$, $i = \overline{1, n}$.

3. Формируется таблица влияния команд на параметры. Для каждого параметра определяется множество команд $\tilde{x}_i$, влияющих на данный параметр $y_i \in Y$.

4. Осуществляется разбиение множества параметров на классы $R_1 \dots R_2$ по правилу: параметры Y_i и Y_j принадлежат к одному и тому же классу только в том случае, если множества команд, которые на них влияют, совпадают:

$$Y_i, Y_j \in R_t, \text{ если } X_i = X_k = X_t, t = \overline{1, k}, i, k = \overline{1, N}.$$

5. Строятся автоматы, описывающие работу каждой из логических подсистем (ЛПС), которые описывают принципы работы каждой из подсистем БА. На данном этапе происходит выделение семантически обобщенных параметров и поиск эквивалентных состояний с дальнейшим синтезом минимальной формы конечной автоматной модели по выражениям (3) и (6).

5.1. Для каждой ЛПС выделяется множество содержательных состояний, формируется таблица состояний.

5.2. Для каждой ЛПС строится таблица допусков, т.е. каждому из содержательно выделенных состояний ЛПС сопоставляется набор допусков параметров, которые принадлежат этой ЛПС.

5.3. Исходя из структуры содержательных состояний, определяются классы параметров $S_k (k = \overline{1, m})$ на основании семантически обобщенных признаков.

5.4. На основании выделенных классов телеметрируемых сообщений определяются обобщенные диагностические признаки (присущие определенным группам телеметрических сообщений) следующим образом:

$$Y^I = \left\{ y_i^I \mid y_i^I = \bigcap_1^m q_i, q_i = \{y_n^j\}^T, \prod_1^r y_n^j = 1, Y^I \in S_k \right\}. \quad (7)$$

5.5. Производится анализ эквивалентности формируемых классов ТМП:

$$q_i \sim q_j \in S_k \text{ при } y_i^I = y_j^I, \text{ где } k = \overline{1, m} \text{ и } i, j = \overline{1, n}. \quad (8)$$

6. Осуществляется синтез минимальной формы конечного автомата (ЛПС) по обобщенному параметру. Для каждой минимальной формы ЛПС строится граф переходов.

7. Из графов переходов ЛПС удаляются петлевые дуги.

8. По отдельным ЛПС для выбранных систем может быть синтезирована полная конечно-автоматная модель.

Пример синтеза минимальной формы конечного автомата по обобщенным диагностическим признакам

На основе примера синтеза декомпозированной конечно-автоматной модели бортовой радиотелеметрической системы БР-9ЦК-1 [8] рассмотрим ЛПС₂ режимов функционирования бортовой радиотелеметрической системы (БРТС).

В табл. 1 представлены управляющие воздействия, подаваемые на БРТС в процессе наземных испытаний [9].

Таблица 1

Управляющие воздействия, подаваемые на БРТС

x_i	Обозначение команды	Время Δt , с	Наименование команды
1	2	3	4
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 с информативностью 25600 изм/с
x_4	«НП32»	10	Включение режима непосредственной передачи с информативностью 3200 изм/с
x_5	«НП32 + ЗАП32»	10	Включение совмещенного режима непосредственной передачи и записи с информативностью 3200 изм/с

Окончание табл. 1

1	2	3	4
x_6	«ЗАП8»	10	Включение режима записи с информативностью 800 изм/с
x_7	«НП8 + ЗАП8»	10	Включение совмещенного режима непосредственной передачи 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 и запуск схемы программно-временного устройства с нулевой отметки
x_{11}	«СТОП ЗУ»	3	Остановка запоминающего устройства
x_{12}	«ИСХ.ЗУ»	3	Приведение запоминающего устройства в исходное состояние (подготовка к записи)
x_{13}	«ВЫКЛ. ПРД»	3	Выключение передатчиков (технологическая команда)
x_{14}	«ВЫКЛ. ТМ»	3	Выключение системы, кроме схемы датчика времени (ДВ) и программно-временного устройства (ПВУ)
x_{15}	«ТК»	3	Работа схемы программно-временного устройства в ускоренном режиме (технологическая команда)

Содержательные состояния и допуски ЛПС₂ представлены в табл. 2 [8].

Таблица 2

Содержательные состояния у ЛПС₂

Состояние	Допуск параметра
q_0^2 – дежурный режим	0 0 0 0 0 0 0 0
q_1^2 – режим непосредственной передачи с информативностью 25600 изм/с (НП256)	0 1 0 0 0 0 1 1
q_2^2 – режим непосредственной передачи с информативностью 3200 изм/с (НП32)	0 1 0 0 0 0 0 1
q_3^2 – совмещенный режим записи и непосредственной передачи с информативностью 3200 изм/с (ЗАП32 + НП32)	0 1 1 0 0 0 0 1
q_4^2 – режим записи с информативностью 800 изм/с (ЗАП8)	0 0 1 1 0 0 1 0
q_5^2 – режим непосредственной передачи с информативностью 800 изм/с (НП8)	0 1 0 0 0 0 1 0
q_6^2 – совмещенный режим записи и непосредственной передачи с информативностью 800 изм/с (НП8 + ЗАП8)	0 1 1 1 0 0 1 0
q_7^2 – 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_8^2 – 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_9^2 – 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_{10}^2 – 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_{11}^2 – 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_{12}^2 – 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_{13}^2 – технологический режим, непосредственная передача по низкой частоте (НП-НЧ (после ЗАП32))	0 0 0 0 0 0 1 0
q_{14}^2 – технологический режим после воспроизведения с информативностью 800 изм/с (Нулевой режим (после В8))	0 0 0 0 0 1 1 0
q_{15}^2 – технологический режим после воспроизведения с информативностью 3200 изм/с (Нулевой режим (после В32))	0 0 0 0 0 1 0 1

Граф перехода ЛПС₂ представлен на рис. 1. По результатам анализа циклограмм проведения испытаний с участием БРТС при построении графа переходов для ЛПС₂ были не отображены некоторые переходы. Так, например, принцип работы БРТС позволяет осуществлять переходы из состояний $q^2_8, q^2_9, q^2_{10}, q^2_{11}, q^2_{12}, q^2_{13}$ в состояния $q^2_1, q^2_2, q^2_3, q^2_4, q^2_6$ по командам $x_3, x_4, x_5, x_6, x_7, x_8, x_9$ для каждого из рассмотренного q^2_i в отдельности, что существенно усложнит представленный граф и окажет влияние на восприятие синтезированной модели. К тому же в процессе наземной подготовки разгонного блока «Фрегат» согласно циклограммам испытаний указанные переходы по перечисленным командам не осуществляются.

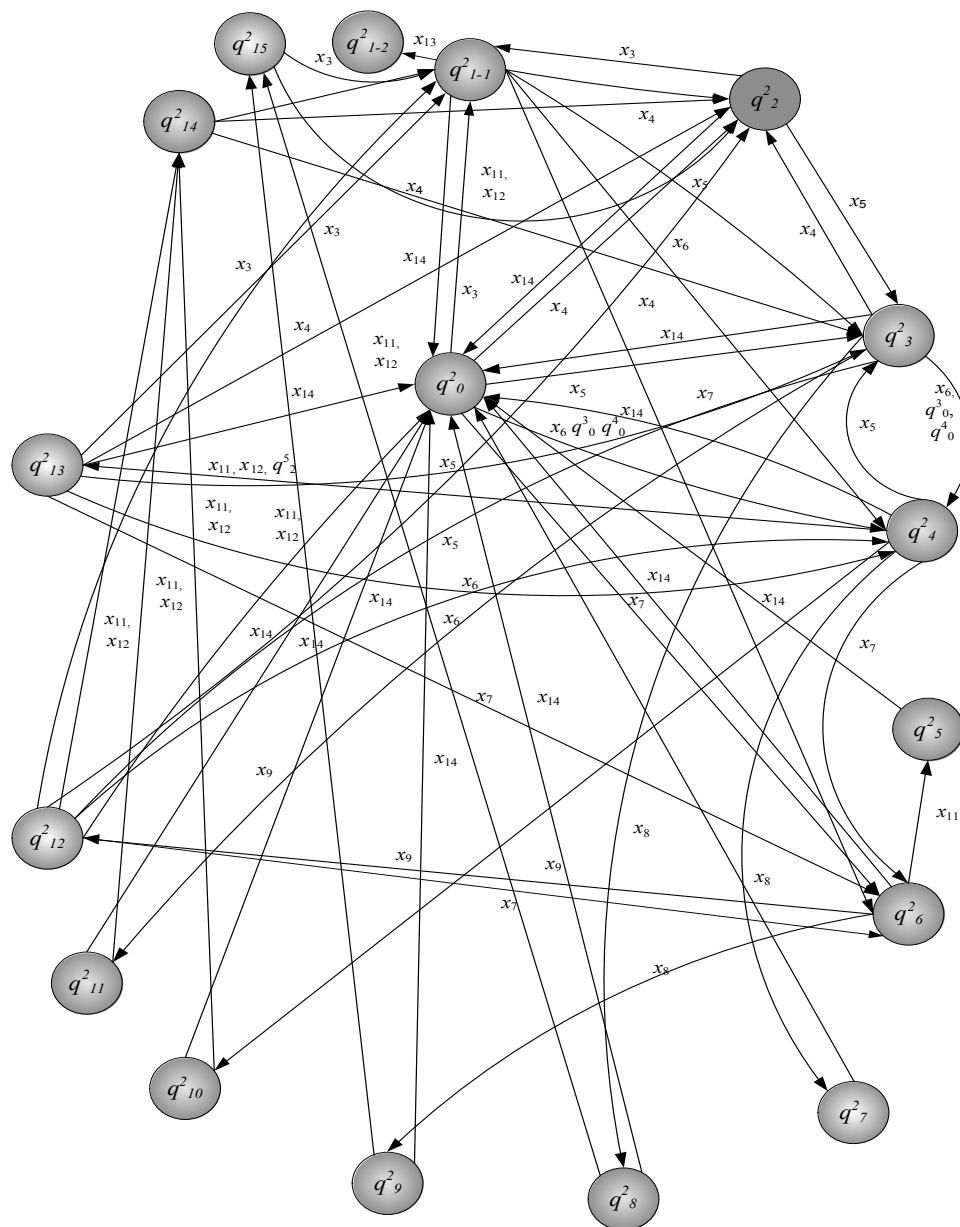


Рис. 1. Граф переходов для ЛПС₂

Рассмотрим возможность синтеза минимальной формы конечного автомата на примере ЛПС₂ режимов функционирования БРТС БР-9ЦК-1 в соответствии с пунктами 5.3–5.5 методики:

1 (п. 5.3). Семантически все 15 режимов, представленных в табл. 2, можно разделить на 6 классов: класс режимов «непосредственная передача информации» (S_1); класс «запись информации» (S_4); класс «непосредственная передача и запись информации» (S_2); класс «воспро-

изведения информации» (S_3); класс «технологические режимы» (S_5). Отдельным классом выделим «дежурный режим», или «режим ожидания команды» (S_0). Данный режим реализуется после подачи питания на бортовую систему, при этом начальные установки следующие: питание приборов системы и передатчиков выключено, запоминающее устройство находится в режиме «СТОП». Переход в дежурный режим осуществляется также после подачи команды « x_{14} », при этом происходит сброс текущих установок и выключение питания приборов.

2 (п. 5.4). В общем виде бинарную последовательность командно-служебного слова можно представить в полиномиальном виде:

$$p_{si}(y) = h_j y^j \oplus \dots \oplus h_2 y^2 \oplus h_1 y^1 \oplus h_0, \quad (9)$$

где $h_j \in \{0,1\}$ – значения разрядов КСС, $j = \overline{1, n}$.

Из анализа структуры командно-служебного слова (КСС) (табл. 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 разряд 7 КСС, значение которого должно быть «1». Применяя для нахождения обобщенного признака выражение (7) и (9), получим

$$p_{s1} = y^6.$$

При наличии «1» в разрядах 7 и 6 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 разрядах 6 и 3 соответственно будет сигнализировать о соответствующем классе.

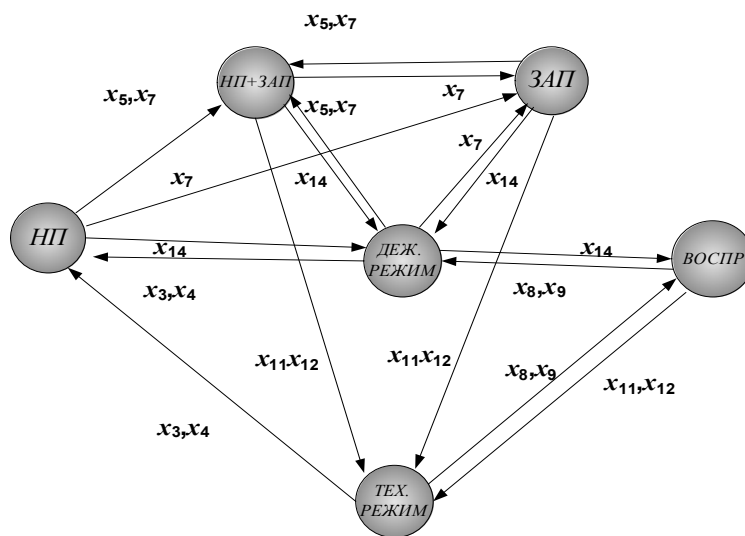
3 (п. 5.5). Относительно данных отличительных разрядов можно говорить об эквивалентности рассматриваемых классов, что в свою очередь дает возможность для синтеза минимальной формы конечного автомата [8] в соответствии с выражением (8). В табл. 4 представлены общие разряды для эквивалентных режимов.

Таблица 4

Эквивалентные классы ЛПС₂ БРТС.

Режим	КСС							
	y^7	y^6	y^5	y^4	y^3	y^2	y^1	y^0
s_0 (ДЕЖ. РЕЖИМ)	0	0	0	0	0	0	0	0
s_1 (НП)	0	1	0	0	0	0	0	0
s_2 (НП + ЗАП)	0	1	1	0	0	0	0	0
s_3 (ВОСПР)	0	0	1	0	0	1	0	0
s_4 (ЗАП)	0	0	1	0	0	0	0	0
s_5 (ТЕХ. РЕЖИМ)	0	0	0	0	0	1	0	0

На рис. 2 представлена минимальная форма конечного автомата ЛПС₂ БР-9ЦК-1 в соответствии с определенными классами эквивалентности. Петлевые дуги в данной модели не обозначены.

Рис. 2. Минимальная форма конечной автоматной модели ЛПС₂ БРТС БР-9ЦК-1

Таким образом, представленная методика позволила сократить количество состояний почти в три 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).

Заключение

Представленная модель показывает возможность синтеза оптимизированных алгоритмов контроля на основе обобщенных диагностических признаков. Однако, как отмечалось выше, максимально возможная достоверность в рамках использованной математической модели может достигаться за счет биективного преобразования множества всевозможных контролируемых параметров в множество диагностических признаков меньшей мощности. Это, в свою очередь, подразумевает решение обратной задачи, которая может быть решена за счет синтеза оптимальной в рамках выбранных критериев программы диагностирования. При разработке специального математического обеспечения процессов идентификации и технического диагностирования бортовой аппаратуры автономных космических аппаратов критериями оптимизации будут являться: обеспечение максимально возможного уровня достоверности контроля ТС БА КА в рамках рассматриваемой математической модели, а также минимизация временных затрат как на синтез, так и на применение оптимальных алгоритмов контроля и диагностирования БА КА.

Список литературы

1. National Aeronautics and Space Administration. NASA Technology Roadmaps TA 4: Robotics and Autonomous Systems. – Draft, 2015. – P. 50–58.
2. Innovative fault detection, isolation and recovery strategies on-board spacecraft: state of the art and research challenges / A. Wander, R. Förstner. – Deutscher Raumfahrtkongress, 2012. – P. 9.
3. ГОСТ 20911–89. Техническая диагностика. Термины и определения. Введ. 1991-01-01. – М. : Изд-во стандартов, 1990.
4. Лоскутов, А. И. Основы испытаний бортовых радиоэлектронных систем / А. И. Лоскутов, Г. И. Козырев. – СПб. : ВКА им. А. Ф. Можайского, 2013. – 158 с.
5. Лоскутов, А. И. Идентификация и техническое диагностирование бортовой аппаратуры автономных космических аппаратов на основе биективного преобразования множества диагностических признаков / А. И. Лоскутов, В. А. Клыков // Контроль. Диагностика. – 2016. – № 4. – С. 57–63.
6. Кочелаев, Ю. С. Автоматизированные испытательные комплексы / Ю. С. Кочелаев. – Вып. 3. Оптимизация алгоритмов автоматизированного тестового контроля. – М. : МО РФ, 1992. – 119 с.
7. Дунаев, В. В. Занимательная математика. Множества и отношения / В. В. Дунаев. – СПб. : БХВ-Петербург, 2008. – 336 с.
8. Лоскутов, А. И. Методика синтеза математической модели функционирования бортовых систем изделий ракетно-космической техники на основе логической декомпозиции / А. И. Лоскутов, В. А. Клыков // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. – 2016. – № 5. – С. 7–18.
9. Телеметрические системы разгонного блока «Фрегат». – М. : ФГУП НПО им. С. А. Лавоочкина, 2007. – 127 с.

Лоскутов Андрей Иванович

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

Loskutov Andrey Ivanovich

doctor of technical sciences, associate professor,
chief of sub-department of telemetric systems
and complex information processing,
Military space Academy
named after A. F. Mozhaisky
(13 Zhdanovskaya street, Saint-Petersburg, Russia)

Клыков Владимир Алексеевич

адъюнкт,
кафедра телеметрических систем
и комплексной обработки информации,
Военно-космическая академия
им. А. Ф. Можайского
(Россия, г. Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13)
E-mail: v.klikoff86@mail.ru

Klykov Vladimir Alekseevich

graduated,
sub-department of telemetric systems
and complex information processing,
Military space Academy
named after A. F. Mozhaisky
(13 Zhdanovskaya street, Saint-Petersburg, Russia)

Шестопалова Ольга Львовна

кандидат технических наук, доцент,
декан факультета «Испытание летательных
аппаратов»,
Филиал «Восход» Московского авиационного
института
(Казахстан, г. Байконур, ул. Гагарина, 5)
E-mail: neman2004@mail.ru

Shestopalova Olga L'vovna

candidate of technical sciences, associate professor,
dean of faculty «Test of aircraft»,
Moscow Aviation Institute
(5 Gagarina street, Baikonur, Kazakhstan)

УДК 681.3

Лоскутов, В. А.

Синтез минимальной формы конечно-автоматной модели функционирования бортовых радиоэлектронных систем космических аппаратов по обобщенным диагностическим признакам / В. А. Лоскутов, В. А. Клыков, О. Л. Шестопалова // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. – 2016. – № 4 (18). – С. 85–95.