

Обратные задачи многоуровневого бортового диагностирования космических аппаратов и некоторые способы их решения

Л.В. Савкин

ПАО «Радиофизика»

android4.1@mail.ru

Введение

Стремительное развитие современной электронной компонентной базы и, в частности, программируемых логических интегральных схем (ПЛИС) радиационностойкого исполнения позволяет сегодня использовать различные концепции реконфигурируемых вычислительных систем (РВС) [2] для решения широкого спектра задач цифровой обработки данных, реализуемых посредством бортовой радиоэлектронной аппаратуры космических аппаратов (КА). В [3, 5] были предложены способы повышения эффективности контрольно-диагностического обеспечения бортовых комплексов управления (БКУ) КА, заключающиеся в аппаратном построении системы функционального контроля и диагностики (СФКД) БКУ в составе единого реконфигурируемого вычислительного поля (РВП). Последнее, в свою очередь, было предложено реализовать на базе ПЛИС класса FPGA.

В процессе проектирования и разработки СФКД значительное внимание уделяется решению так называемых *обратных задач диагностирования* БКУ КА [4]. Под ними, как правило, понимается формирование некоторой совокупности базовых проверок, которые позволяют однозначно зафиксировать неисправность или отказ БКУ КА с заданной степенью точности [4], или глубиной локализации в случае многоуровневого [1] диагностирования БКУ КА. Решение обратных задач многоуровневого диагностирования бортовых систем КА составляет фундаментальную основу для выбора конкретных алгоритмов диагностики и контроля, образующих эффективное контрольно-диагностическое обеспечение БКУ КА. Многоуровневая диагностика, в свою очередь, подразумевает наличие предварительно выделенных условных аппаратных уровней $Q_i, i = \overline{1, n}$ и условных программных уровней $P_j, j = \overline{1, m}$ структурно-функциональной иерархии служебных и целевых систем КА.

1. Построение реконфигурируемой СФКД БКУ КА

Рассмотрим предложенную в [3] реконфигурируемую СФКД БКУ КА. На рис. 1 представлена ее общая структурная организация, из которой видно, что РВП СФКД делится на три основных фрагмента:

- 1) фрагмент реконфигурируемых измерительных каналов (РИК);
- 2) фрагмент реконфигурируемого дублирующего поля (РДП);
- 3) фрагмент реконфигурируемых тестовых каналов (РТК).

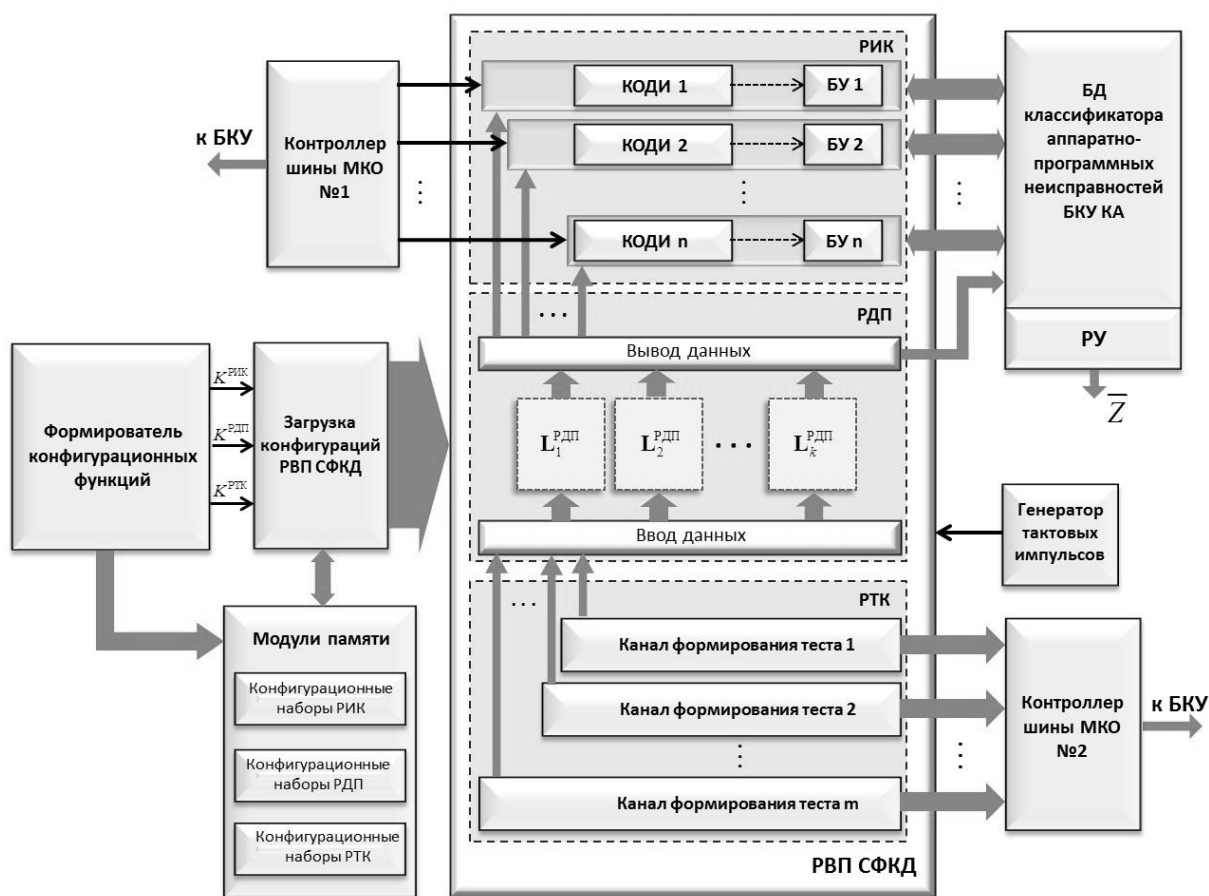


Рис. 1. Структурная организация реконфигурируемой СФКД БКУ КА

Фрагмент РИК реализует аппаратным образом n независимых диагностических каналов, каждый из которых, в свою очередь, состоит из канала обработки диагностической информации (КОДИ) и буферного устройства (БУ). В КОДИ осуществляется обработка диагностической информации, поступающей от контрольных точек БКУ КА через мультиплексный канал обмена (МКО). На базе КОДИ, в зависимости от значения конфигурационной функции $K^{\text{РИК}}$, может быть реализован либо логический анализатор (диагностика преимущественно программной

составляющей БКУ), либо сигнатурный анализатор (диагностика преимущественно аппаратной составляющей БКУ), которые через БУ осуществляют сопоставление регистрируемых данных с эталонными данными, хранящимися в пополняемой базе данных (БД) классификатора аппаратно-программных неисправностей БКУ КА. Результатом сопоставления регистрируемых данных от РИК и эталонных данных от БД классификатора неисправностей является сформированный в решающем устройстве (РУ) вектор технического состояния БКУ КА \bar{Z} , на основе оценки параметров которого определяются как глубина неисправности или отказа БКУ, так и эффективность выбранного алгоритма обработки диагностической информации в КОДИ.

Фрагмент РДП отводится для проведения диагностики дискретных элементов БКУ КА методом эквивалентного дублирования аппаратуры, что достигается путем создания необходимой эталонной конфигурации цифровых устройств БКУ в одной из матриц дублирующего поля $\mathbf{L}_d^{\text{РДП}}$, где $d = \overline{1, k}$ – условный порядковый номер матричного набора КЛБ в РДП. Из рис. 1 также видно, что анализ данных, полученных в результате диагностирования дискретных элементов аппаратных подсистем БКУ методом эквивалентного дублирования, может осуществляться как напрямую (через БД классификатора неисправностей БКУ КА), так и через РИК. И в том и в другом случаях, тестовые воздействия формируются в фрагменте РТК.

Фрагмент РТК представляет собой многоканальный формирователь тестов БКУ КА, каждый из которых реализуется аппаратным образом в одном из m каналов формирования тестов и полностью может быть описан конфигурационной функцией $K^{\text{РТК}}$. Выдача тестовых сигналов, которые в процессе идентификации технического состояния БКУ могут корректироваться, осуществляется через независимый контроллер шины МКО №2.

Конфигурационную функцию любого из функциональных фрагментов РВП СФКД можно представить в виде следующей зависимости

$$K_h^{\text{РВП}} = F(\mathbf{L}_h, G(\mathbf{L}_h)),$$

где \mathbf{L}_h – матричный набор КЛБ, реализующий h -й функциональный фрагмент РВП СФКД, который, в свою очередь, можно записать как

$$\mathbf{L}_h = \mathbf{L}^{(q)} = \mathbf{L}^{(1)} = \left\| \begin{array}{cccc} \gamma_{11} L_{11}^{(1)} & \gamma_{12} L_{12}^{(1)} & \cdots & \gamma_{1k} L_{1k}^{(1)} \\ \gamma_{21} L_{21}^{(1)} & \gamma_{22} L_{22}^{(1)} & \cdots & \gamma_{2k} L_{2k}^{(1)} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \gamma_{m1} L_{m1}^{(1)} & \gamma_{m2} L_{m2}^{(1)} & \cdots & \gamma_{mk} L_{mk}^{(1)} \end{array} \right\|,$$

где q – условный аппаратный уровень функционального элемента в РВП СФКД (в данном случае $q = 1$), $L_{ij}^{(1)}$ – логико-арифметическая функция, реализуемая посредством КЛБ, расположенного в i -ой строке и j -ом столбце матрицы \mathbf{L}_h ($i = \overline{1, m}$, $j = \overline{1, k}$), γ_{ij} – функция включения (задействия) КЛБ в вычислительной операции и описываемая выражением

$$\gamma_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{если КЛБ } L_{ij}^{(1)} \text{ включен (задействован)}, \\ 0, & \text{если КЛБ } L_{ij}^{(1)} \text{ выключен (незадействован)}. \end{cases}$$

Орграф $G(\mathbf{L}_h)$ описывает топологию логико-арифметических связей между КЛБ-вершинами в матрице \mathbf{L}_h , задавая тем самым строгую аппаратную конфигурацию выделенного функционального фрагмента РВП (канал обработки, канал формирования, участок дублирующего поля и т. п.).

Во внешних модулях памяти содержатся конфигурационные наборы аппаратных архитектур трех основных фрагментов РВП СФКД, реализующих штатное контрольно-диагностическое обеспечение БКУ КА с известными признаками аппаратно-программных неисправностей БКУ. При этом в процессе анализа и идентификации технического состояния БКУ в течение всего срока активного существования КА, реконфигурируемая СФКД может пополняться как новыми конфигурационными наборами аппаратных архитектур РВП, так и новыми признаками аппаратных и программных неисправностей БКУ.

Несмотря на высокие функциональные возможности, ожидаемые от практической реализации контрольно-диагностического обеспечения БКУ КА на базе реконфигурируемой СФКД, нельзя не отметить, что максимальной эффективности от аппаратно-программного построения диагностического обеспечения любой бортовой аппаратуры КА можно достигнуть лишь при едином комплексном подходе к проектированию как данной аппаратуры, так и ее средств бортового диагностирования.

Особое место в способах решения обратных задач диагностирования занимает подход И.М. Синдеева [4], посредством которого осуществляется минимизация набора контролируемых параметров на основе анализа их признаков информативности.

Данный подход подразумевает использование априорных вероятностных данных о диагностируемых подсистемах и элементах БКУ.

2. Сигнатурный подход в решении обратных задач многоуровневой диагностики БКУ КА

Кроме вышеназванного метода в существует более простой способ решения обратных задач многоуровневого диагностирования БКУ, который относится к анализу и идентификации технического состояния БКУ КА методами сигнатурного анализа. Для реализации данного способа необходимо предварительно составить дерево структурной иерархии БКУ КА (рис. 2) и отметить в нем наборы контрольных точек, отвечающие за состояние того или иного условного аппаратного уровня БКУ.

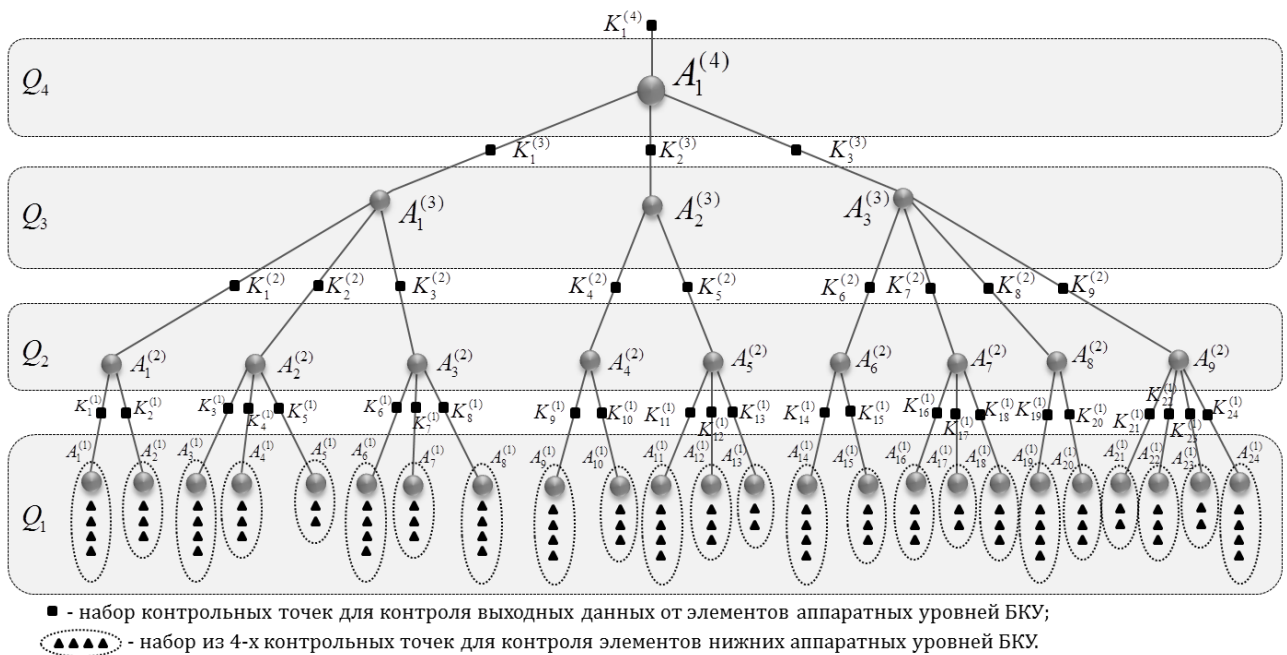


Рис. 2. Пример дерева структурной иерархии БКУ КА

На рис. 1 показан пример структурной иерархии БКУ КА с числом условных аппаратных уровней ($q = 4$). Верхний аппаратный уровень Q_4 соответствует уровню системы БКУ КА $A_1^{(4)}$ и может контролироваться набором контрольных точек $K_1^{(4)}$. Данный набор отводится для решения задачи функционального контроля, поскольку данные выходных контрольных точек могут соответствовать итоговому вектору управляющей информации $\overline{R_{упр.}}$, формирующемуся в БКУ для управления служебной и целевой аппаратурой КА. Третий аппаратный уровень Q_3 формируют образующие БКУ подсистемы $A_1^{(3)}, A_2^{(3)}, A_3^{(3)}$, что можно записать как

$$Q_3 = A_1^{(3)} \cup A_2^{(3)} \cup A_3^{(3)}.$$

Для контроля каждого элемента уровня Q_3 имеются наборы контрольных точек $K_1^{(3)}, K_2^{(3)}$ и $K_3^{(3)}$. Аналогичным образом наборы контрольных точек имеются для каждого элемента $A_v^{(n)}$, где $n = \overline{1, q}$ - условный аппаратный уровень БКУ, v - порядковый номер структурного элемента на условном аппаратном уровне БКУ. В данном случае задача минимизации набора контролируемых параметров может также сводиться к сокращению общего числа контрольных точек, способных зарегистрировать неисправности структурных элементов на условных аппаратных уровнях БКУ.

В ходе разработки и исследования эффективных способов аппаратной реализации методов сигнатурного анализа для схемы встроенного контроля БКУ возникла необходимость в разработке критерия ранжирования взаимозависимых параметров технического состояния БКУ, на основе которого можно было бы установить минимальный набор контрольных точек, способный обеспечить максимальную глубину идентификации неисправности или отказа элемента на уровне системы (в данном случае БКУ) или отказа условного аппаратного уровня (рис. 3).

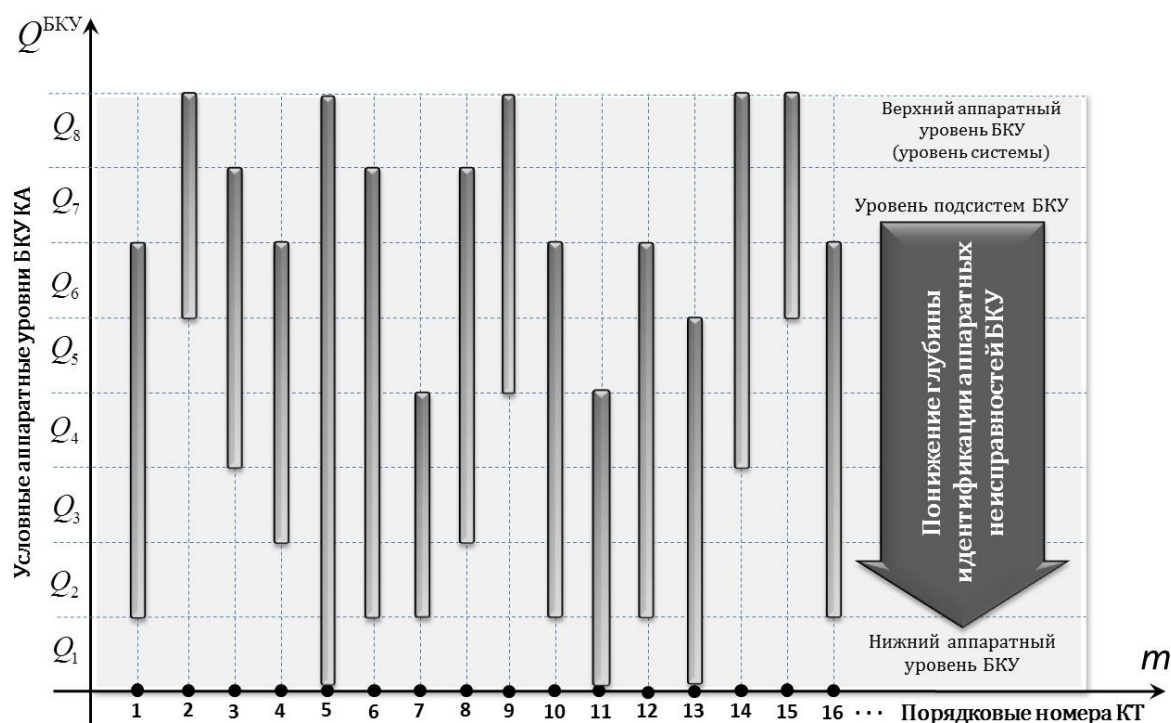


Рис. 3. Информативность диагностических данных при решении обратных задач многоуровневого диагностирования БКУ КА

В качестве критериев ранжирования взаимозависимых параметров технического состояния БКУ КА можно рассматривать:

- число условных аппаратных уровней, регистрируемых методами сигнатурного анализа в постоянном наборе контрольных точек по принципу «снизу-вверх»;
- число условных аппаратных уровней, регистрируемых методами сигнатурного анализа в постоянном наборе контрольных точек по принципу «сверху-вниз»;
- максимальная глубина идентификации неисправности на q -м аппаратном уровне.

В процессе моделирования функциональной (схемотехнической) иерархии БКУ КА была рассмотрена возможность проведения анализа взаимозависимости контролируемых параметров БКУ на основе постоянных параллельно-последовательных функциональных связей между отдельными дискретными цифровыми элементами (устройствами) БКУ, не зависящими от штатных конфигураций аппаратного обеспечения БКУ.

Пусть, к примеру, одним из параметров вектора технического состояния БКУ \bar{Z} является вектор технического состояния троированной бортовой цифровой вычислительной машины (БЦВМ) \bar{B} , определяемый функциональной зависимостью

$$\bar{M} = F(t, a_1, a_2, a_3, b_1, b_2, b_3, d_1, d_2, d_3), \quad (1)$$

где a_1, a_2, a_3 – логические переменные (принимающие значение 1 для исправного состояния или 0 для неисправного состояния) технического состояния процессоров ввода вывода (ПВВ) БЦВМ; b_1, b_2, b_3 – логические переменные технического состояния центральных процессоров (ЦП) БЦВМ; d_1, d_2, d_3 – логические переменные технического состояния структурных слоев адаптивного мажоритарного органа БЦВМ; t – время.

В случае сигнатурного анализа дискретных цифровых систем на примере троированной БЦВМ БКУ с адаптивным мажоритарным органом, соответствующей (1), понятие взаимозависимости переменных технического состояния можно применить следующим образом.

Логическая переменная технического состояния первого ПВВ может принимать значения

$$a_1 = \begin{cases} 1, & \text{если } \bar{X} = \bar{X}^*; \\ 0, & \text{если } \bar{X} \neq \bar{X}^*, \end{cases} \quad (2)$$

где $\bar{X} = [x_1 \ x_2 \ x_3 \ \dots \ x_p]$ – векторный набор сигнатур, регистрируемых в контрольных точках первого ПВВ БЦВМ, с порядковыми номерами от 1 до p ; $\bar{X}^* = [x_1^* \ x_2^* \ x_3^* \ \dots \ x_p^*]$ – векторный набор эталонных сигнатур с соответствующими вектору \bar{X} порядковыми номерами от 1 до p .

По аналогии с (2) логическая переменная технического состояния первого структурного слоя адаптивного мажоритарного органа БЦВМ БКУ определяется как

$$d_1 = \begin{cases} 1, & \text{если } \bar{Y} = \bar{Y}^*; \\ 0, & \text{если } \bar{Y} \neq \bar{Y}^*, \end{cases}$$

где $\bar{Y} = [y_1 \ y_2 \ y_3 \ \dots \ y_g]$ – векторный набор сигнатур, регистрируемых в контрольных точках первого слоя мажоритарного органа, с порядковыми номерами от 1 до g ; $\bar{Y}^* = [y_1^* \ y_2^* \ y_3^* \ \dots \ y_g^*]$ – векторный набор эталонных сигнатур с соответствующими вектору \bar{Y} порядковыми номерами от 1 до g .

Тогда ввиду того, что в штатных конфигурациях БЦВМ БКУ неисправность, возникшая в первом ПВВ, может привести к регистрации нештатной сигнатуры в векторном наборе сигнатур первого слоя мажоритарного органа \bar{Y} , схемотехнически расположенного последовательно с ПВВ, взаимозависимость между \bar{X} и \bar{Y} можно записать в операторной форме в виде простого выражения

$$X = W_h \cdot Y, \quad h = \overline{1, H},$$

где X – вектор сигнатур, регистрируемых в контрольных точках первого ПВВ; Y – вектор сигнатур, регистрируемых в контрольных точках первого слоя мажоритарного органа БЦВМ, включенного последовательно с первым ПВВ; W – логический оператор, учитывающий топологическую взаимосвязь между контрольными точками первого ПВВ и контрольными точками первого слоя мажоритарного органа в h -х конфигурациях БЦВМ БКУ, т. е.

$$W_h = const.$$

Взаимозависимые переменные технического состояния БКУ КА возможно выявить лишь на основе данных о функциональной иерархии БКУ, поскольку лишь она

учитывает все особенности цифровой обработки данных, предусмотренных аппаратно-программным построением БКУ.

Заключение

Поскольку все аппаратные архитектуры контрольно-диагностического обеспечения БКУ реализуются непосредственно в РВП СФКД, то эффективность решения любой обратной задачи многоуровневого диагностирования БКУ КА полностью определяется орграфами $G^Q(X, H)$ и $G^P(W, R)$, описывающими, соответственно, аппаратную и программную иерархию БКУ. В случае многоуровневой диагностики БКУ КА (рис.) методами сигнатурного анализа на условных аппаратных уровнях Q_i и условных программных уровнях P_j процедуры решения обратных задач многоуровневого бортового диагностирования БКУ можно представить в виде следующих соответствующих выражений

$$G^Q(X, H) \xrightarrow{F_{обр}^Q} s_k^i \in X^i,$$
$$G^P(W, R) \xrightarrow{F_{обр}^P} s_y^j \in W^j,$$

где X - множество функциональных вершин (аппаратных элементов) орграфа G^Q , описывающего аппаратную структурно-функциональную иерархию БКУ КА; H - множество дуг орграфа G^Q ; W - множество функциональных вершин (программных модулей) орграфа G^P , описывающего программную иерархию БКУ КА; R - множество дуг орграфа G^P ; s_k^i - конечный набор сигнатур ($k = \overline{1, K}$), позволяющий зарегистрировать неисправность функционального элемента на i -ом условном аппаратном уровне БКУ КА; s_y^j - конечный набор сигнатур ($y = \overline{1, Y}$), позволяющий зарегистрировать неисправность программного модуля на j -ом условном программном уровне БКУ КА.

Литература

1. Алексеев А.А., Кораблев Ю.А., Шестопалов М.Ю. Идентификация и диагностика систем.-М.: Издательский центр «Академия», 2009. – 352 с.
2. Каляев И.А., Левин И.И., Семерников Е.А., Шмойлов В.И. Реконфигурируемые мультиконвейерные вычислительные структуры / Под общ. ред. И.А. Каляева. 2-е изд., перераб., доп. Ростов-на-Дону: Изд-во ЮНЦ РАН, 2009. - 344 с.

3. *Савкин Л.В., Шишаков А.Е., Новичков В.М.* Построение реконфигурируемой системы функционального контроля и диагностики бортового комплекса управления космического аппарата. *Авиакосмическое приборостроение*, №6, 2015. с. 8-13.

4. Сафарбаков А.М., Лукьянов А.В., Пахомов С.В. Основы технической диагностики: учебное пособие. – Иркутск: ИрГУПС, 2006. – 2016 с.

5. *Шишаков А.Е., Новичков В.М., Савкин Л.В., Макаров А.С.* Расширение функциональных возможностей системы контроля и диагностики бортового комплекса управления космического аппарата за счет встроенных реконфигурируемых вычислительных структур. *Вестник НПО им. С.А. Лавочкина*, №2, 2015. с. 45-51.