

**Л.В. Савкин**

специалист 1-й категории

E-mail: android4.1@mail.ru

(ПАО «Радиофизика»)

Москва, Российская Федерация

**Аппаратная реализация логики «один из трех» в схемах адаптивного мажоритарного резервирования бортовых цифровых вычислительных систем космических аппаратов**

В статье рассмотрена возможность реализации логики «один из трех» в схемах адаптивного мажоритарного резервирования бортовых цифровых вычислительных систем, входящих в состав бортовых комплексов управления космических аппаратов. Данную возможность предлагается реализовать аппаратным образом на базе ранее предложенной реконфигурируемой системы функционального контроля и диагностики бортового комплекса управления космического аппарата.

В первой части статьи дан краткий обзор наиболее распространенных схем мажоритарного резервирования бортовых цифровых вычислительных систем современных космических аппаратов. На основе классической схемы тройного резервирования с одним мажоритарным органом и трехслойной схемы мажоритарного резервирования показаны примеры, приводящие к проблеме реализации логики «один из трех». Рассмотрены основные особенности построения и принципы функционирования адаптивного мажоритарного органа, способного наиболее эффективно по сравнению с двумя предыдущими схемами решать проблему логики «один из трех».

Во второй части статьи предложено построение адаптивного мажоритарного органа в составе вычислительной области реконфигурируемого дублирующего поля системы функционального контроля и диагностики. В качестве основного метода независимого контроля и тестирования вычислительных каналов предложено использовать метод булевых производных. Генерацию инверсных значений входных и промежуточных параметров функций управления предложено осуществлять в области реконфигурируемых тестовых каналов, входящей в состав системы функционального контроля и диагностики. Получены выражения, позволяющие однозначно идентифицировать неисправности вычислительных каналов по изменению значений булевых производных. Показано, что аппаратная реализация логики «один из трех» с одновременным применением тестов вычислительных каналов по методу булевой производной является удобной ввиду возможности прямого доступа к наборам контрольных точек каждого из трех независимых вычислительных каналов за счет использования схем встроенного контроля.

**Ключевые слова:** бортовая цифровая вычислительная система; избыточность; резервирование; аппаратный; адаптивный мажоритарный орган; реконфигурация; логика «один из трех»; контроль; диагностика.

**L.V. Savkin**Expert 1<sup>st</sup> Category

E-mail: android4.1@mail.ru

(PJSC «Radiofizika»)

Moscow, Russian Federation

**Hardware Implementation «One of Three» Logic in Spacecrafts Onboard Digital Computing Systems with the Adaptive Majority Reservation Schemes**

In article possibility of implementation «one of three» logic in onboard digital computing systems with the adaptive majority reservation schemes which are a part of spacecrafts onboard control complexes is considered. The present possibility is offered to be realized in the hardware way on the basis of earlier offered spacecraft onboard control complex reconfigurable functional monitoring and diagnostics system. In the first part of article the short review of most widespread majority reservation of modern spacecrafts onboard digital computing systems is this. On the basis of classical triple reservation scheme with the one majority device and the three-layer majority reservation scheme examples leading «one of three» logic problem of implementation are shown. The main creation features and the functioning principles of the adaptive majority device capable are considered is the most effective in comparison with two previous schemes to solve a «one of three» logic problem. In the second part of article creation adaptive majority device as a part of functional monitoring and diagnostics system computing reconfigurable duplicating field area is offered. As the main method computing channels independent monitoring and testing is offered to use a Boolean derivatives method. It is offered to realize generation of inverse control functions input values and intermediate parameters in the functional monitoring and diagnostics system reconfigurable test channels field is a part. The expressions for identification computing channels single-digit failure of on change Boolean derivatives values are received. It is shown that the «one of three» logic hardware implementation with simultaneous application computing channels tests with the Boolean derivative method of a is convenient in view direct access possibility to sets break points each of three independent computing channels due to use built-in monitoring scheme.

**Keywords:** onboard digital computing system; redundancy; reservation; hardware; adaptive majority device; reconfiguration; «one of three» logic; control; diagnostics.

## Введение

Использование цифровых схем с резервируемыми избыточными аппаратными архитектурами и элементами является одним из фундаментальных принципов построения отказоустойчивой аппаратуры ответственного назначения, к которой относится вся современная космическая техника без исключений. Не говоря о специфике функционирования бортовой аппаратуры космических аппаратов (КА) в условиях открытого космоса и характере внешних воздействующих факторов, при практической реализации отказоустойчивых аппаратных средств цифровой обработки информации важное место уделяется способам аппаратно-программного построения систем резервирования и реконфигурации, включающих в свой состав арбитражное устройство. Независимо от способа реализации (аппаратного или программного) последнего, в его основные задачи входит контроль состояния функционирующей и резервной аппаратуры и управление реконфигурацией аппаратуры в случаях обнаружения неисправностей и отказов ее элементов [1...8].

В настоящее время на практике наиболее широкое применение получили так называемые *мажоритарные схемы резервирования бортовых систем КА*, в которых в качестве арбитражного устройства используется мажоритарный орган (МО), реализуемый, как правило, программно-алгоритмическими средствами, входящими в состав системы контроля и диагностики (СКД) бортовой цифровой вычислительной системы (БЦВС) бортового комплекса управления (БКУ) КА [1, 3, 6]. При этом сама СКД, в большинстве случаев, представляет собой специализированное программное обеспечение (ПО), которое совместно с функциональным ПО и базовой операционной системой входит в состав программно-алгоритмического обеспечения БЦВС БКУ КА [1, 4...6].

В ряде предыдущих работ [9...18] были предложены и подробно рассмотрены способы организации контрольно-диагностического обеспечения БКУ КА на базе реконфигурируемых вычислительных систем (РВС) [19...22]. Последние, в свою очередь, предлагалось практически реализовать на основе программируемых логических интегральных схемах (ПЛИС) класса FPGA. В данных работах основной акцент был сделан на повышении гибкости контрольно-диагностического обеспечения БКУ с одновременным расширением функциональных возможностей СКД аппаратными методами.

Повышение гибкости контрольно-диагностического обеспечения БКУ КА достигалось путем представления алгоритмов контроля и диагностики БКУ в виде орграфов  $G(F, X)$ , которые «накладывались» на реконфигурируемое вычислительное поле (РВП) СКД и могли кардинальным образом перестраиваться на низком аппаратном уровне в процессе анализа и идентификации технического состояния БКУ с заданной степенью точности [9, 19]. Здесь в качестве  $F$  выступает

множество базовых функциональных вершин орграфа, реализующих ту или иную логико-арифметическую операцию, и соответствующих одному из конфигурируемых логических блоков (КЛБ) из состава единого РВП СКД. Множество  $X$  представляет собой множество дуг орграфа, описывающих топологию однонаправленных логико-арифметических связей между КЛБ-вершинами, образующими в конечном итоге полный орграф  $G(F, X)$ .

Расширение функциональных возможностей СКД было обусловлено, прежде всего, тем, что РВП позволяло вводить в состав СКД новые аппаратные архитектуры, которые не были предусмотрены штатным контрольно-диагностическим обеспечением БКУ КА [12, 16, 18]. Так, помимо методов компактного тестирования БЦВС БКУ в СКД появилась возможность диагностики отдельных модулей БЦВС методом аппаратного дублирования аппаратуры, создавая необходимые эквивалентные аппаратные архитектуры непосредственно в составе РВП СКД [13]. Кроме того, в работах [9, 13] было показано, что использование схем встроенного контроля БКУ совместно с возможностями низкоуровневой реконфигурации СКД позволяет в некоторых случаях осуществлять восстановление отдельных контуров управления и обработки данных БКУ путем «перенесения» данного контура непосредственно в область РВП реконфигурируемой СКД.

Поскольку задача управления мажоритарными схемами резервирования БЦВС БКУ КА отводится в большинстве случаев именно на СКД, то в рамках данной работы предлагается рассмотреть возможность аппаратной реализации алгоритмов управления мажоритарными схемами резервирования БЦВС на основе ранее предложенной [13] реконфигурируемой системы функционального контроля и диагностики (СФКД) БКУ КА. При этом наибольший интерес для нас будут представлять адаптивные мажоритарные схемы с логикой «один из трех», поскольку их характерной особенностью является то, что сам МО, формирующий команды управления реконфигурацией системы, должен также обладать способностью к перестроению своей внутренней архитектуры, т. е. способностью к реконфигурации.

*Цель работы* – рассмотреть возможность аппаратной реализации логики «один из трех» в схемах адаптивного мажоритарного резервирования БЦВС БКУ КА с помощью ранее предложенной реконфигурируемой СФКД БКУ КА.

## Схемы мажоритарного резервирования БЦВС КА и проблема реализации логики «один из трех»

В самом общем случае основная идея любой мажоритарной схемы резервирования БЦВС КА заключается в том, чтобы МО выдавал лишь те данные от независимых каналов обработки информации, которые являются идентичными при их поразрядном сопоставлении друг с другом [1, 3, 6]. Случаи, когда результаты, полученные на выходе одного из каналов обработки

информации, отличаются от остальных, свидетельствуют о неисправности данного канала. Задачи распознавания таких случаев возлагаются, как правило, на СКД, в которой также формируется и команда на реконфигурацию БЦВС [1, 2, 6].

Прежде чем приступить к рассмотрению мажоритарных схем БЦВС с адаптивными МО, рассмотрим для начала два самых распространенных варианта их структурного построения.

**1. Классическая схема тройного резервирования БЦВС КА с одним МО**

Наиболее распространенные типы мажоритарных схем, находящих применение в БЦВС БКУ современных КА, реализуют так называемую логику «два из трех». Данная логика подразумевает применение в БЦВС трех независимых вычислительных каналов (ВК), которые одновременно могут включать в себя центральные процессоры и процессоры ввода-вывода [1] и один МО (рис. 1).

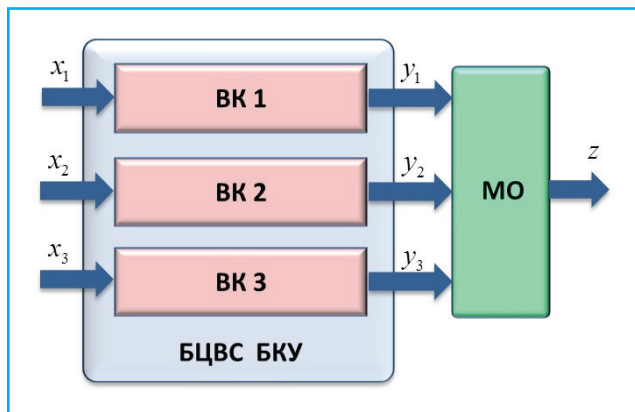


Рис. 1. Схема мажоритарного резервирования с тремя ВК и одним МО

Реализация логики «два из трех» применительно к рассматриваемой архитектуре рассчитана на тот случай, когда неисправность одного из ВК не повлияет на достоверность итоговых данных, формируемых на выходе МО, что, в свою очередь, можно записать как

$$z \equiv \begin{cases} y_1 \& y_2 \& y_3, \\ y_1 \& y_2 \mid (\neq y_3), \\ y_1 \& y_3 \mid (\neq y_2), \\ y_2 \& y_3 \mid (\neq y_1), \end{cases}$$

где  $z$  – данные на выходе МО;  $x_1, x_2, x_3$  – данные на входах идентичных ВК;  $y_1, y_2, y_3$  – выходные данные от ВК, поступающие в МО.

Вероятность безотказной работы БКУ с аппаратной архитектурой данного типа вычисляется по формуле

$$P_{\text{БКУ}} = P_{\text{МО}} (3P_{\text{ВК}}^2 - 2P_{\text{ВК}}^3),$$

где  $P_{\text{БКУ}}$  – вероятность безотказной работы БКУ, содержащего в своем составе три ВК и один МО, реализующий логику «два из трех»;  $P_{\text{МО}}$  – вероятность безотказной работы МО;  $P_{\text{ВК}}$  – вероятность безотказной работы ВК [6].

Уже на примере данной мажоритарной схемы подходим к проблеме реализации логики «один из трех», которая автоматически возникает в том случае, когда один из двух оставшихся исправных ВК также выходит из строя. Вполне очевидным в рамках рассматриваемого примера является тот факт, что невозможно однозначно различить исправно работающий ВК от неисправного, предварительно не предусмотрев возможность решения данной проблемы методами независимого контроля функционирования как отдельных ВК, так и МО в частности. На практике одним из наиболее распространенных независимых способов контроля функционирования ВК является использование методов контрольного суммирования и помехоустойчивого кодирования обрабатываемой в ВК информации. Простейшим примером того является добавление контрольного разряда  $a^*$  к  $k$ -разрядной последовательности вида

$$A = a_1 a_2 a_3 \dots a_{k-1} a_k a^*,$$

так, чтобы суммарное число единиц в последовательности  $A$  было нечетным, т. е.

$$a^* = \begin{cases} 1, & \text{если } \sum_{i=1}^k a_i \pmod{2} = 0, \\ 0, & \text{если } \sum_{i=1}^k a_i \pmod{2} = 1, \end{cases}$$

где  $a_i, i = \overline{1, k}$  – значение  $i$ -го разряда последовательности  $A$ , не содержащей в первоначальном состоянии контрольного разряда  $a^*$  [3, 6].

Принципиально другим подходом в реализации отказоустойчивых архитектур БЦВС БКУ КА является применение многослойных схем мажоритарного резервирования ВК с одновременным резервированием МО.

**2. Трехслойная схема мажоритарного резервирования БЦВС КА**

На рисунке 2 представлена упрощенная структурная организация трехканальной БЦВС БКУ КА, в которой реализована трехслойная мажоритарная схема с тремя наборами резервируемых МО.

В представленной архитектуре БЦВС обработка информации в каждом из трех ВК осуществляется через слои, содержащие в своем составе также и наборы резервных МО. Каждый из слоев «разбивает» процедуры обработки информации, реализуемые отдельными ВК, на три этапа. При этом неисправность, возникшая, к примеру, в МО первого слоя, устраняется только во втором, т. е. последующем слое [3, 6].

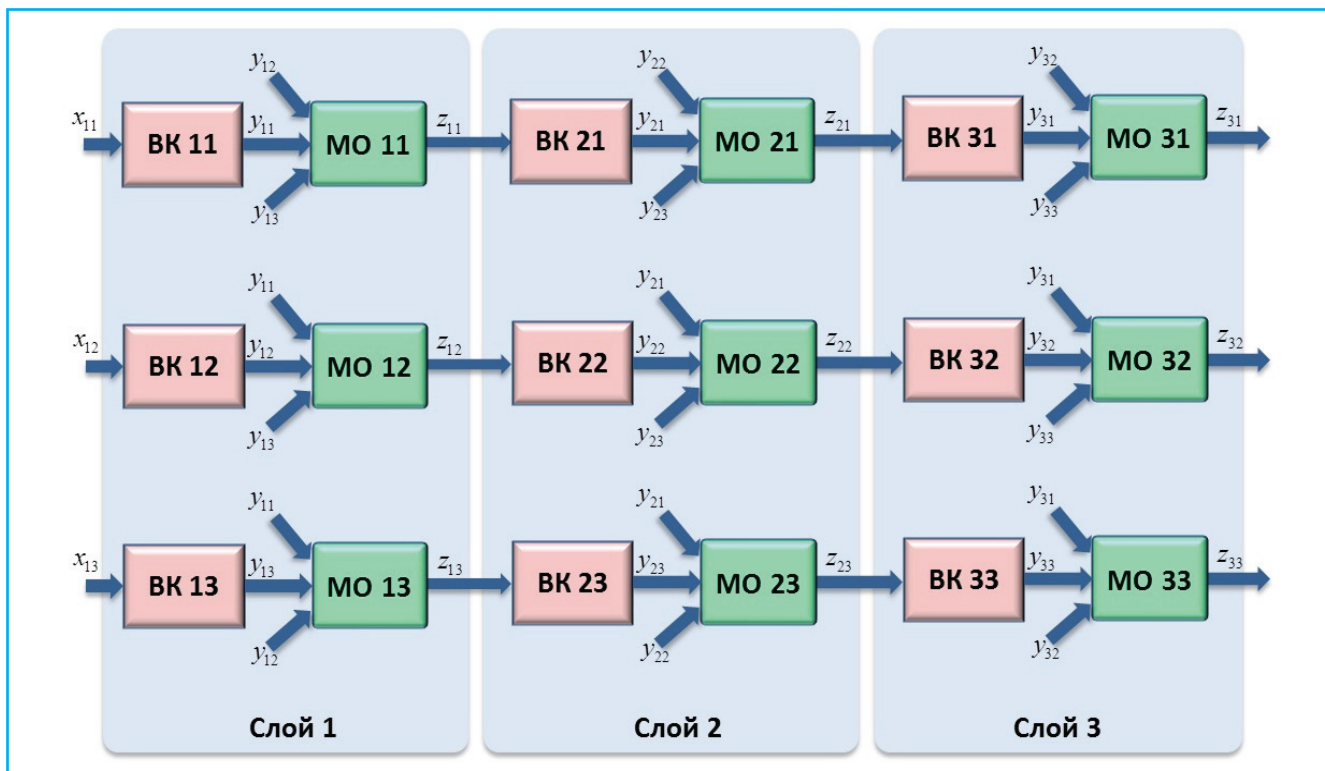


Рис. 2. Трехслойная мажоритарная схема с резервированием МО

Переход к подобным архитектурам обусловлен тем, что рассмотренная в п.1 архитектура не позволяет превысить значение  $p_{\text{БКУ}}$  более чем значение  $p_{\text{МО}}$  [3]. В соответствии с работой [6] вероятность безотказной работы БКУ с БЦВС, реализованной по трехслойной мажоритарной схеме с резервированием МО, будет составлять значение

$$p_{\text{БКУ}}^{(3)} = p_{\text{МО}} (3p_{\text{ВК}}^2 - 2p_{\text{ВК}}^3)^3 (3p_{\text{МО}}^2 - 2p_{\text{МО}}^3)^3,$$

или

$$p_{\text{БКУ}}^{(3)} = p_{\text{МО}} (27p_{\text{ВК}}^6 - 54p_{\text{ВК}}^7 + 36p_{\text{ВК}}^8 - 8p_{\text{ВК}}^9) \times (27p_{\text{МО}}^6 - 54p_{\text{МО}}^7 + 36p_{\text{МО}}^8 - 8p_{\text{МО}}^9),$$

где  $p_{\text{БКУ}}^{(3)}$  – вероятность безотказной работы БКУ с БЦВС, построенной по схеме трехслойного мажоритарного резервирования;  $p_{\text{МО}}$  – вероятность безотказной работы МО;  $p_{\text{ВК}}$  – вероятность безотказной работы ВК. В работе [6] приводится также пример расчета оптимального числа слоев для многослойных мажоритарных схем резервирования БЦВС, которые в данной работе опущены.

Основным недостатком вышеприведенной схемы, помимо общего усложнения аппаратной архитектуры, является невозможность ее использования при отказе двух ВК, о чем также упоминается в работе [6]. Таким образом, снова подходим к проблеме реализации логики «один из трех» в схемах мажоритарного резервирования, решение которой в современных БЦВС БКУ КА осуществляется путем использования адаптивных МО.

### 3. Схема мажоритарного резервирования БЦВС БКУ КА с адаптивным МО

На рисунке 3 представлена структурная схема, поясняющая принцип построения и функционирования адаптивного МО в схемах мажоритарного резервирования БЦВС БКУ КА.

Для реализации адаптивных МО в функциональную схему БЦВС добавляется формирователь команд на реконфигурацию (ФКР) БКУ, который в современных КА

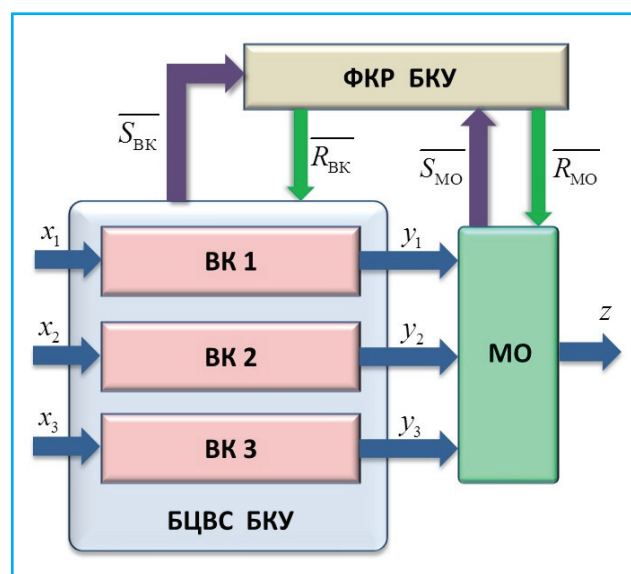


Рис. 3. К пояснению принципа построения и функционирования адаптивного МО

реализуется в большинстве случаев программными средствами СКД БКУ. В задачи ФКР БКУ входит как контроль функционирования ВК и МО на основе анализа параметров соответствующих векторов состояний  $\overline{S_{ВК}}$  и  $\overline{S_{МО}}$ , так и выдача команд на реконфигурацию ВК и МО с помощью соответствующих команд  $\overline{R_{ВК}}$  и  $\overline{R_{МО}}$ .

В данном случае параметрами общего вектора  $\overline{S_{ВК}}$  являются три вектора состояний каждого из ВК БЦВС  $\overline{S_{ВК1}}$ ,  $\overline{S_{ВК2}}$  и  $\overline{S_{ВК3}}$ , т. е.  $\overline{S_{ВК}} = \{\overline{S_{ВК1}}, \overline{S_{ВК2}}, \overline{S_{ВК3}}\}$ .

Необходимость в реализации логики «один из трех» с использованием адаптивного МО возникает в том случае, когда СКД зафиксировала не идентичность данных в оставшихся двух ВК БЦВС. Поэтому независимо от способа реализации адаптивного МО, вся идея его использования сводится к тому, чтобы выходные данные  $z$  представляли собой выходные данные только от исправного ВК. В нашем случае этими выходными данными будут являться  $y_1$ ,  $y_2$  или  $y_3$ .

При проектировании адаптивных мажоритарных схем резервирования БЦВС основной задачей является та, которая позволяет ответить на вопрос: каким образом будет организовано контрольно-диагностическое обеспечение каждого из ВК БЦВС, которое позволит своевременно идентифицировать неисправность, изолировать ее и восстановить работоспособность. Данная формулировка вопроса представляет собой, так называемые, *требования FDIR* (англ., *fault detection, isolation and recovery*), которые должны безоговорочно предъявляться к любым средствам управления современных КА [23, 24].

Таким образом, задачу реализации логики «один из трех» в схемах адаптивного мажоритарного резервирования многоканальной БЦВС в самом общем случае можно рассматривать как обеспечение блокировки данных, формируемых на выходах неисправных ВК, т. е. даже не прибегая к коммутации ВК как таковой. Ранее уже отмечалось что, большинство способов реализации подобных алгоритмов являются программными. Далее рассмотрим предлагаемый аппаратный способ реализации логики «один из трех» в схеме адаптивного мажоритарного резервирования БЦВС, основанный на использовании ранее предложенной [13] реконфигурируемой СФКД БКУ КА.

#### Аппаратная реализация логики «один из трех» в реконфигурируемой СФКД БКУ КА

Основная идея аппаратной реализации логики «один из трех» в реконфигурируемой СФКД основана не только на возможности построения контрольно-диагностических алгоритмов на базе выделенных фрагментов РВП СФКД. Как отмечалось в ранних работах [10, 11, 13...18] само по себе построение реконфигурируемой СФКД в составе БКУ КА предусматривает доступ к некоторому постоянному набору контрольных точек каждого из ВК. Именно благодаря этому в СФКД возможно осуществлять контроль функционирования

ВК БЦВС на отдельных этапах обработки входной информации БКУ, т. е. в тех пределах, которые позволяет нам это сделать схема встроенного контроля БКУ. Кроме того, в составе СФКД реализовано самотестирование аппаратных архитектур [18], которое также направлено на повышение достоверности результатов, получаемых в процессе анализа технического состояния отдельных подсистем БКУ как по схемам встроенного контроля ВК, так и через мультиплексный канал обмена (МКО).

Прежде чем приступить к рассмотрению одного из возможных вариантов аппаратной реализации логики «один из трех» с помощью реконфигурируемой СФКД, для удобства приведем еще раз из работы [13] особенности ее аппаратно-программного построения и функционирования.

#### 1. Особенности построения и функционирования реконфигурируемой СФКД БКУ КА

На рисунке 4 представлена аппаратно-программная организация реконфигурируемой СФКД БКУ КА.

Основным элементом реконфигурируемой СФКД БКУ КА является единое РВП, которое делится на три основных вычислительных области: область реконфигурируемых измерительных каналов (РИК), область реконфигурируемого дублирующего поля (РДП) и область реконфигурируемых тестовых каналов (РТК).

В области РИК аппаратным образом реализуются  $n$  независимых диагностических каналов, каждый из которых, в свою очередь, состоит из канала обработки диагностической информации (КОДИ) и буферного устройства (БУ). С помощью каждого КОДИ осуществляется основная обработка диагностической информации, поступающей от бортовых систем КА через шину МКО и через формирователь сигнатур от схем встроенного контроля, входящих в состав каждого ВК БЦВС.

В зависимости от значения конфигурационной функции  $K^{РИК}$ , описывающей аппаратную архитектуру каждого КОДИ, на базе последнего могут быть реализованы либо логический анализатор, либо сигнатурный анализатор. В первом случае осуществляется диагностика преимущественно программной части БКУ КА, во втором – диагностика преимущественно аппаратной части БКУ КА. Каждый КОДИ через БУ осуществляет сопоставление регистрируемых данных с эталонными данными, хранящимися в пополняемой базе данных (БД) классификатора аппаратно-программных неисправностей БКУ. Конечным результатом сопоставления регистрируемых и эталонных данных является сформированный в решающем устройстве (РУ) вектор технического состояния БКУ  $\overline{Z_{БКУ}}$ . На основе оценки параметров вектора  $\overline{Z_{БКУ}}$  определяются как глубина неисправности БКУ на условном аппаратном уровне, так и эффективность выбранного алгоритма обработки диагностической информации в КОДИ и на фрагменте РИК в целом.

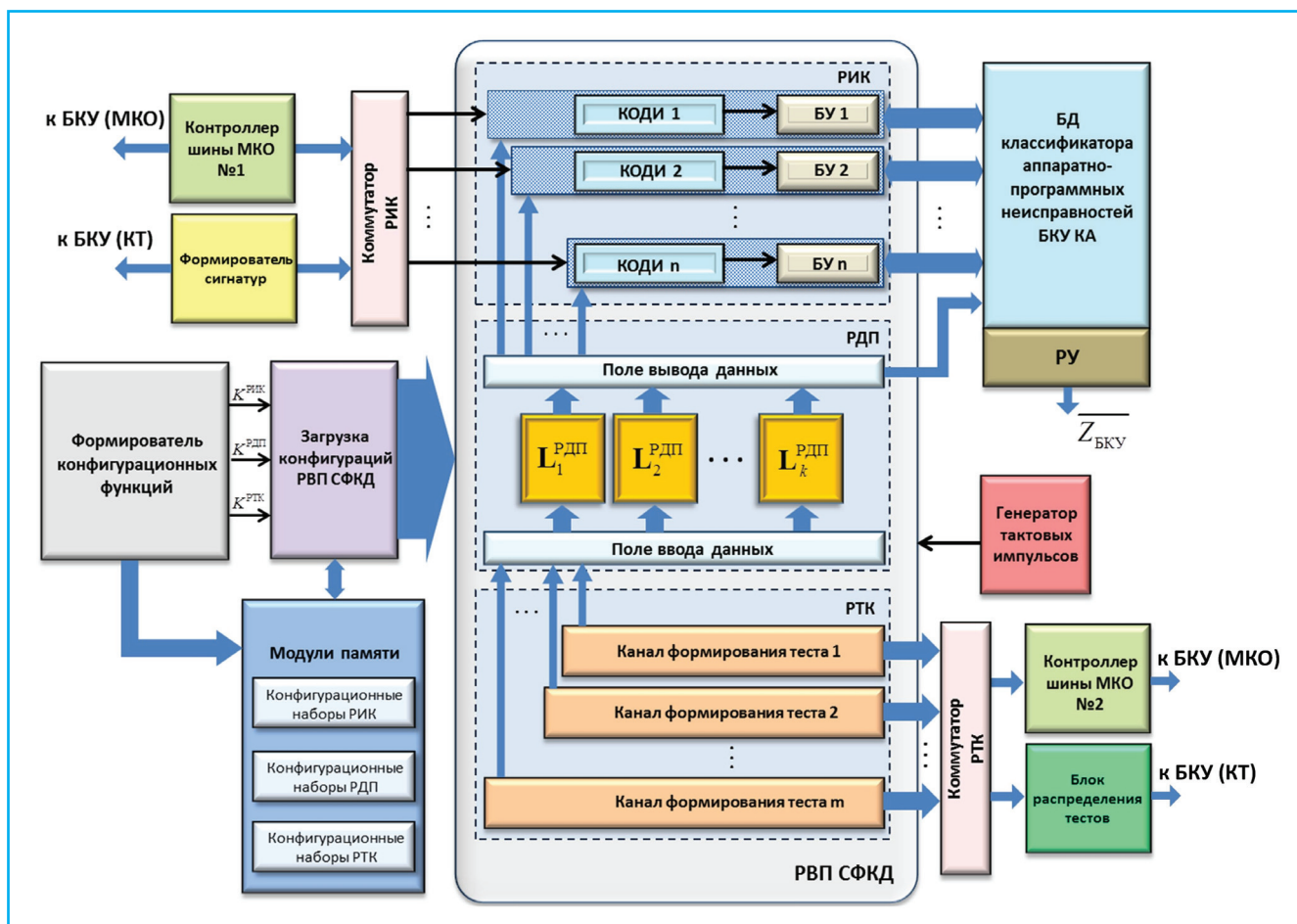


Рис. 4. Аппаратно-программная организация реконфигурируемой СФКД БКУ КА

С помощью области РДП осуществляется диагностика дискретных элементов БЦВС БКУ методом эквивалентного дублирования аппаратуры. Это достигается путем создания необходимой эталонной конфигурации цифровых устройств в одной из матриц дублирующего поля  $L_d^{РДП}$ , которая также может быть использована для восстановления отдельных контуров управления (обработки информации) БКУ за счет схем встроенного контроля ВК БЦВС. Здесь  $d = 1, D$  – условный порядковый номер матричного набора КЛБ в области РДП. Из рисунка 4 также видно, что анализ данных, полученных в результате диагностирования дискретных элементов БЦВС методом эквивалентного дублирования, может осуществляться как напрямую (через БД классификатора аппаратно-программных неисправностей КА), так и через область РИК. В обоих случаях с целью централизованного функционирования СФКД тестовые воздействия формируются в вычислительной области РТК.

Архитектура области РТК представляет собой многоканальный формирователь тестов БКУ, каждый из которых аппаратно реализуется в одном из  $m$  каналов формирования тестов и полностью описывается конфигурационной функцией  $K^{РТК}$ . Выдача тестовых сигналов осуществляется через независимый контроллер шины (КШ) МКО и через блок

распределения тестов по схемам встроенного контроля ВК БЦВС.

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

$$K_h^{РВП} = F(L_h, G(L_h)),$$

где  $L_h$  – матричный набор КЛБ, реализующий  $h$ -й функциональный фрагмент РВП СФКД;  $G(L_h)$  – орграф, описывающий топологию логико-арифметических связей между КЛБ-вершинами в матрице  $L_h$ , т. е. аппаратную архитектуру фрагмента РВП СФКД.

В модулях памяти хранятся загрузочные конфигурационные файлы аппаратных архитектур трех основных фрагментов РВП СФКД, реализующих штатное контрольно-диагностическое обеспечение БКУ КА с известными признаками аппаратно-программных неисправностей. В процессе контроля технического состояния БКУ в течение всего срока активного существования БКУ КА реконфигурируемая СФКД может пополняться как новыми конфигурационными наборами аппаратных архитектур РВП, так и новыми признаками аппаратно-программных неисправностей БКУ КА.

Итак, рассмотрены основные особенности аппаратно-программной организации реконфигурируемой

СФКД БКУ КА. Перейдем теперь к рассмотрению одного из возможных вариантов аппаратной реализации логики «один из трех» с помощью реконфигурируемой СФКД.

**2. Аппаратная реализация адаптивного мажоритарного органа в РВП СФКД**

Возможность контроля состояния каждого ВК БЦВС с помощью реконфигурируемой СФКД обеспечивается двумя способами.

*Первый способ* заключается в анализе данных о техническом состоянии ВК БЦВС через КШ МКО. В данном случае реконфигурируемая СФКД подключается к МКО как самостоятельная подсистема КА, при этом непосредственно в СФКД могут формироваться данные, которые будут предназначены лишь для тестового

контроля БКУ. В то же время организация обмена данными СФКД с БКУ через шину МКО предусматривает аппаратную реализацию в РВП СФКД алгоритмов функционального контроля. Это достигается путем оценки векторов входной и выходной информации БКУ КА через доступ реконфигурируемой СФКД к различным подсистемам БКУ через шину МКО.

*Второй способ* заключается в возможности оценки функционирования ВК БЦВС на отдельных этапах обработки и формирования управляющей информации БКУ путем использования доступа реконфигурируемой СФКД к постоянному набору контрольных точек БКУ КА по схеме встроенного контроля. Большим достоинством данного способа является возможность восстановления отдельных участков обработки информации в ВК БЦВС, поскольку в области РДП реконфигурируемой СФКД можно сформировать требуемую архитектуру,

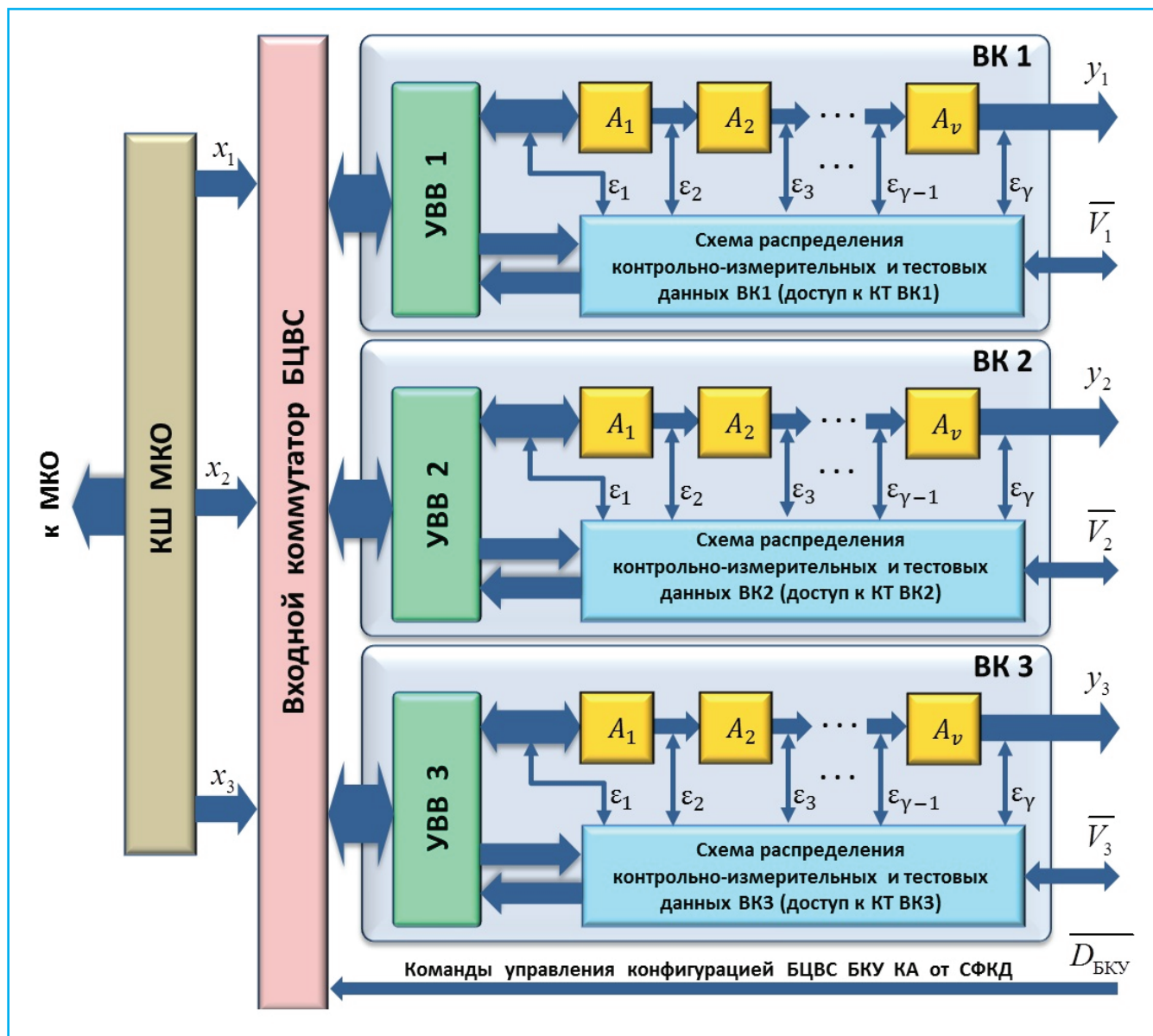


Рис. 5. К пояснению способа реализации адаптивного мажоритарного органа БЦВС с помощью реконфигурируемой СФКД БКУ КА

заменяв ею вышедшую из строя, т. е. путем «перенесения» в область РВП СФКД. Кроме того, именно благодаря второму способу контроля состояния ВК, возможна реализация алгоритмов многоуровневого [25] диагностирования БКУ КА, поскольку методы функционального контроля обладают значительно меньшей глубиной локализации неисправностей ВК, т. к. не имеют доступа к «промежуточным» контрольным точкам ВК.

Рассмотрим рисунок 5, поясняющий способ реализации адаптивного мажоритарного органа БЦВС с помощью реконфигурируемой СФКД БКУ КА.

Для того чтобы наглядно проиллюстрировать возможные процедуры реконфигурации БЦВС, состоящей из трех идентичных ВК, выделим в данной структурной схеме внешний входной коммутатор, посредством которого можно будет осуществлять управление распределением данных  $x_1, x_2$  и  $x_3$ , поступающих от МКО через КШ по трем независимым каналам на входы соответствующих ВК. При этом, интуитивно, понятно, что для того, чтобы блокировать данные на входе МО от того или иного неисправного ВК, использование коммутатора, так как показано на рисунке 5 вовсе необязательно. В состав каждого ВК входят устройства ввода-вывода (УВВ), схема распределения контрольно-измерительных и тестовых данных, обеспечивающая доступ к контрольным точкам каждого из ВК, и аппаратные модули  $A_1, A_2, \dots, A_n$ , реализующие последовательную обработку информации в ВК.

Схема встроенного контроля позволяет в любой момент использовать в двустороннем порядке обращение к контрольным точкам (стимулирующее тестирование или контрольные замеры) каждого из ВК БЦВС, включая входные  $x_1, x_2$  и  $x_3$  и выходные  $y_1, y_2$  и  $y_3$  последовательности. Все необходимые для СФКД данные от контрольных точек (либо к контрольным точкам) ВК, объединяются в цифровые пакеты непосредственно в схеме контрольно-измерительных и тестовых данных. Эти пакеты на рисунке 5 обозначены соответствующими векторами  $\bar{V}_1, \bar{V}_2, \bar{V}_3$ .

Предлагаемый в данной работе способ аппаратной реализации логики «один из трех», заключается в том, что сам МО будет полностью реализован в одной из матриц области РДП реконфигурируемой СФКД.

Теперь предположим, что через схему встроенного контроля можно иметь полный доступ к контрольным точкам ВК1, ВК2 и ВК3, при этом необходимо сделать важное замечание, касающееся того, что элементы  $A_1, A_2, \dots, A_n$  на рисунке 5 изображены в строгой последовательности. В данном случае не стоит рассматривать данную последовательность соединенных элементов в буквальном смысле. Самым важным обстоятельством в рассматриваемой структуре БЦВС является то, что данные  $y_1, y_2$  и  $y_3$  на соответствующих выходах ВК представляют собой функции, зависящие от параметров  $\varepsilon^{(w)} = \varepsilon_1^{(w)}, \varepsilon_2^{(w)}, \varepsilon_3^{(w)}, \dots, \varepsilon_{\gamma-1}^{(w)}, \varepsilon_\gamma^{(w)}$ , где  $w = 1, 2, 3$  – порядковый номер ВК, т. е.

$$y_1 = y_1(\varepsilon^{(1)}) = y_1(\varepsilon_1^{(1)}, \varepsilon_2^{(1)}, \varepsilon_3^{(1)}, \dots, \varepsilon_{\gamma-1}^{(1)}, \varepsilon_\gamma^{(1)}),$$

$$y_2 = y_2(\varepsilon^{(2)}) = y_2(\varepsilon_1^{(2)}, \varepsilon_2^{(2)}, \varepsilon_3^{(2)}, \dots, \varepsilon_{\gamma-1}^{(2)}, \varepsilon_\gamma^{(2)}),$$

$$y_3 = y_3(\varepsilon^{(3)}) = y_3(\varepsilon_1^{(3)}, \varepsilon_2^{(3)}, \varepsilon_3^{(3)}, \dots, \varepsilon_{\gamma-1}^{(3)}, \varepsilon_\gamma^{(3)}).$$

Тогда, производная булевых функций  $y_w(\varepsilon_i^{(w)})$  будет иметь вид

$$\frac{dy_w(\varepsilon_i^{(w)})}{d\varepsilon_i^{(w)}} = y_w(\varepsilon_i^{(w)}) \oplus y_w(\overline{\varepsilon_i^{(w)}}), \quad (1)$$

где  $\varepsilon_i^{(w)}$  и  $\overline{\varepsilon_i^{(w)}}$ , соответственно, прямое и инверсное значение входного параметра  $\varepsilon_i, i = \overline{1, \gamma}$  для ВК с порядковым номером  $w$  и выходной функцией  $y_w(\varepsilon_i^{(w)})$ .

Здесь необходимо отметить, что в соответствии с определением булевой производной, выражение (1) позволяет найти такие значения логических параметров  $\varepsilon_1^{(w)}, \varepsilon_2^{(w)}, \varepsilon_3^{(w)}, \dots, \varepsilon_{\gamma-1}^{(w)}, \varepsilon_\gamma^{(w)}$  (все кроме  $\varepsilon_i^{(w)}$ ), при которых изменение значения  $\varepsilon_i^{(w)}$  приводит к изменению значения функции  $y_w(\varepsilon_1^{(w)}, \varepsilon_2^{(w)}, \varepsilon_3^{(w)}, \dots, \varepsilon_{\gamma-1}^{(w)}, \varepsilon_\gamma^{(w)})$  [26]. При этом не существенным является тот факт, каким образом меняется ее значение: с нуля на единицу, или с единицы на ноль.

Далее, полагая, что все значения производных от функций  $y_w(\varepsilon_i^{(w)})$ , соответствующие исправному состоянию ВК БЦВС, заранее известны, можно записать выражение, позволяющее однозначно идентифицировать неисправность ВК по изменению значения параметра  $\varepsilon_i^{(w)}$  на его  $i$ -ом входе:

$$\begin{cases} \varepsilon_i^{(w)} \frac{dy_w(\varepsilon_i^{(w)})}{d\varepsilon_i^{(w)}} = 0 \Leftrightarrow \overline{\varepsilon_i^{(w)}} \frac{dy_w(\varepsilon_i^{(w)})}{d\varepsilon_i^{(w)}} = 1, & \text{если } i\text{-й вход ВК исправен;} \\ \varepsilon_i^{(w)} \frac{dy_w(\varepsilon_i^{(w)})}{d\varepsilon_i^{(w)}} = 1 \Leftrightarrow \overline{\varepsilon_i^{(w)}} \frac{dy_w(\varepsilon_i^{(w)})}{d\varepsilon_i^{(w)}} = 0, & \text{если } i\text{-й вход ВК неисправен.} \end{cases} \quad (2)$$

Все инверсные значения  $\varepsilon_i^{(w)}$ , необходимые для их подстановки в выражение (2), предлагается генерировать в каналах формирования тестов области РТК реконфигурируемой СФКД. Характер двунаправленного обмена данными между БКУ и реконфигурируемой СФКД через прямой доступ к контрольным точкам ВК можно формально записать как

$$\bar{V} = \bar{V} \downarrow + \bar{V} \uparrow = (\bar{V}_1 \downarrow + \bar{V}_1 \uparrow) + (\bar{V}_2 \downarrow + \bar{V}_2 \uparrow) + (\bar{V}_3 \downarrow + \bar{V}_3 \uparrow),$$

где  $\bar{V} \downarrow$  – поток данных, поступающих от БКУ в СФКД;  $\bar{V} \uparrow$  – поток данных, поступающих от СФКД в БКУ. Тогда, учитывая, что инверсные значения  $\varepsilon_i^{(w)}$  будут включены в состав потока данных от СФКД в БКУ, можно записать

$$\bar{V}_1 \uparrow = \{\varepsilon_i^{(1)}\} = \{\varepsilon_1^{(1)}, \varepsilon_2^{(1)}, \varepsilon_3^{(1)}, \dots, \varepsilon_{\gamma-1}^{(1)}, \varepsilon_\gamma^{(1)}\}, \quad (3)$$

$$\bar{V}_2 \uparrow = \{\varepsilon_i^{(2)}\} = \{\varepsilon_1^{(2)}, \varepsilon_2^{(2)}, \varepsilon_3^{(2)}, \dots, \varepsilon_{\gamma-1}^{(2)}, \varepsilon_\gamma^{(2)}\}, \quad (4)$$

$$\bar{V}_3 \uparrow = \{\varepsilon_i^{(3)}\} = \{\varepsilon_1^{(3)}, \varepsilon_2^{(3)}, \varepsilon_3^{(3)}, \dots, \varepsilon_{\gamma-1}^{(3)}, \varepsilon_\gamma^{(3)}\}. \quad (5)$$

Совокупность данных (3)...(5) представляет собой все возможные варианты инверсных значений  $\varepsilon_i^{(w)}$ , которые могут потребоваться СФКД для идентификации технического состояния ВК БЦВС со степенью точности до его  $i$ -го входа.

В области РДП с помощью аппаратной архитектуры, реализующей адаптивный МО, осуществляется сопоставление данных на основе выражения (2). Значения булевых производных, соответствующие исправным состояниям  $i$ -х входов ВК по наборам параметров  $\{\varepsilon_i^{(1)}\}$ ,  $\{\varepsilon_i^{(2)}\}$  и  $\{\varepsilon_i^{(3)}\}$  предлагается хранить во внешнем относительно РВП классификаторе аппаратно-программных неисправностей БКУ КА, т. е. там же, где хранятся все эталонные данные о техническом состоянии БКУ.

Таким образом, при аппаратной реализации логики «один из трех» использование тестов ВК БЦВС по методу производной от булевой функции является очень удобным ввиду возможности прямого доступа к наборам контрольных точек каждого из трех независимых ВК. При этом все процедуры сопоставления данных (значения функций  $y_w$  и их производных), требуемые для идентификации неисправностей ВК, предлагается осуществлять непосредственно реконфигурируемой СФКД.

### Заключение

Итак, рассмотрена возможность реализации логики «один из трех» в схемах адаптивного мажоритарного резервирования трехканальной БЦВС, входящей в состав БКУ КА. Данную возможность было предложено реализовать аппаратными средствами с помощью ранее предложенной реконфигурируемой СФКД БКУ КА.

В первой части статьи был дан краткий обзор наиболее распространенных схем мажоритарного резервирования БЦВС БКУ современных КА. На основе классической схемы тройного резервирования БЦВС КА с одним МО и трехслойной схемы мажоритарного резервирования БЦВС КА были показаны примеры, приводящие к проблеме реализации логики «один из трех». Затем были рассмотрены основные принципы построения и функционирования адаптивного МО, способного наиболее эффективно по сравнению с двумя предыдущими схемами мажоритарного резервирования решать проблему логики «один из трех».

Во второй части было предложено реализовать адаптивный МО в составе вычислительной области РДП реконфигурируемой СФКД. В качестве основного метода независимого контроля и тестирования ВК было предложено использовать метод булевых производных. Генерацию инверсных значений входных и промежуточных параметров функций управления  $y_w$  было предложено осуществлять в области РТК, входящей в состав реконфигурируемой СФКД. Получены выражения, позволяющие однозначно идентифицировать неисправность ВК по изменению значений параметров  $\varepsilon_i^{(w)}$ . Показано, что аппаратная

реализация логики «один из трех» с одновременным использованием тестов ВК БЦВС по методу булевой производной является удобной ввиду возможности прямого доступа к наборам контрольных точек каждого из трех независимых ВК по их схемам встроеного контроля.

### Список литературы

1. Бровкин А.Г., Бурдыгов Б.Г., Гордийко С.В. и др. *Бортовые системы управления космическими аппаратами* / Под ред. профессора А.С. Сырова. М.: Изд-во МАИ-ПРИНТ, 2010. 304 с.
2. Заведеев А.И., Ковалев А.Ю. Диагностика состояния и принципы повышения отказоустойчивости бортовой системы управления космического аппарата // *Электронный журнал «Труды МАИ»*. 2012, № 54. С. 1–10.
3. Иьуду К.А. *Надежность, контроль и диагностика вычислительных машин и систем*: учебное пособие для вузов. М.: Высшая школа, 1989. 216 с.
4. Микрин Е.А. *Бортовые комплексы управления космическими аппаратами и проектирование их программного обеспечения*. М.: Изд. МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2003. 336 с.
5. Микрин Е.А. *Бортовые комплексы управления космическими аппаратами*: учебное пособие. М.: Изд. МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2014. 245 с.
6. Орлов С.А., Цилькер Б.Я. *Организация ЭВМ и систем*: учебник для вузов. 3-е изд. СПб.: Питер, 2014. 688 с.
7. Умнов А.А. *Проектирование бортовых комплексов управления*: текст лекций СПб ГУАП. СПб.: Издательство «Санкт-Петербург», 2000. 59 с.
8. Харченко В., Юрченко Ю. *IOTS-подход: анализ вариантов структур отказоустойчивых бортовых комплексов при использовании электронных компонентов Industry*. Электронный ресурс: <http://catalog.gaw.ru/index.php?id=991&page=document> (дата обращения: 31.01.2016).
9. Савкин Л.В. *О решении задач бортового диагностирования космических аппаратов с помощью реконфигурируемых вычислительных систем. Технические науки – от теории к практике* / Сборник статей по материалам XXXIX международной научно-практической конференции. Новосибирск: Издательство «СибАК». 2014, № 10 (35). С. 79–88.
10. Савкин Л.В. Предварительное ранжирование сигнатурных данных при организации многоуровневого диагностирования бортового комплекса управления космического аппарата // *Информационно-измерительные и управляющие системы*. 2015, № 12. С. 34–40.
11. Савкин Л.В. *Ранжирование взаимозависимых переменных технического состояния бортового комплекса управления космического аппарата при формировании оптимальной диагностической модели в реконфигурируемой системе функционального контроля и диагностики*. Восьмой Международный

- Аэрокосмический Конгресс. Тезисы докладов. М.: АИР, 2015. С. 180–181.
12. Савкин Л.В., Ширшаков А.Е., Новичков В.М. О графах больших размерностей относительно выделенного участка, возникающих при формировании диагностических моделей в реконфигурируемом вычислительном поле системы функционального контроля и диагностики бортового комплекса управления космического аппарата // *Электронный журнал «Наука и образование»*, МГТУ им. Н.Э. Баумана. 2015, № 3. С. 85–101. URL: <http://technomag.edu.ru/doc/759301.html> (дата обращения: 31.01.2016).
  13. Савкин Л.В., Ширшаков А.Е., Новичков В.М. Построение реконфигурируемой системы функционального контроля и диагностики бортового комплекса управления космического аппарата // *Авиакосмическое приборостроение*. 2015, № 6. С. 8–13.
  14. Savkin L.V., Makarov A.S. About diagnostic support of onboard equipment of aircraft on the basis of reconfigurable computing systems / Global Science and Innovation: materials of the III International Scientific Conference, Chicago, October 23–24th, 2014 / Publishing office Accent Graphics communications. Chicago, USA. 2014, pp. 357–361.
  15. Savkin L.V., Shirshakov A.E., Novichkov V.M., Klochko O.S., Makarov A.S. The hardware implementation of diagnostic algorithms for onboard systems of aircraft on the basis of reconfigurable computing structures / Science, Technology and Higher Education: materials of the VI International research and practice conference, Westwood, November 12–13th, 2014 / Publishing office Accent Graphics communications. Westwood, Canada. 2014, pp. 410–415.
  16. Savkin L.V., Klochko O.S., Makarov A.S. The introduction logic arifmetical redundance at low hardware level in the reconfigurable system monitoring and diagnostics of the spacecraft. European Science and Technology: materials of the IX international research and practice conference, Munich, December 24–25th, vol. II., 2014 / Publishing office Vela Verlag Waldkraiburg. Munich, Germany, 2014, pp. 436–442.
  17. Savkin L.V., Klochko O.S., Makarov A.S. About the adaptive redistribution topology of logic arifmetical communications of a computing field in the reconfigurable system monitoring and diagnostics for onboard complex to control of the spacecraft / European Conference on Innovations in Technical and Natural Sciences. Proceedings of the 5th International scientific conference (December 23, 2014). «East West» Association for Advanced Studies and Higher Education GmbH. Vienna. 2014, pp. 76–84.
  18. Savkin L.V. Self-testing fixed topology of basic diagnostic models in the reconfigurable computing field of system the functional monitoring and diagnostics an onboard complex to control of the spacecraft / The First European Conference on Informational Technology and Computer Science. Proceedings of the conference (March 3, 2015). «East West» Association for Advanced Studies and Higher Education GmbH. Vienna. 2015, pp. 64–69.
  19. Каляев И.А., Левин И.И., Семерников Е.А., Шмойлов В.И. *Реконфигурируемые мультиконвейерные вычислительные структуры*, 2-е изд. Ростов-на-Дону: Изд-во ЮНЦ РАН, 2009. 344 с.
  20. Катаев О.В. Об одном подходе к построению отказоустойчивых бортовых многопроцессорных вычислительно-управляющих систем // *Искусственный интеллект*. 2008, № 4. С. 538–544.
  21. Hauck S. Reconfigurable computing. The theory and practice of FPGA-based computation. Morgan Kaufmann Publ., 2007. 944 p.
  22. Gokhale M., Graham P.S. Reconfigurable Computing – Accelerating Computation with Field-Programmable Gate Arrays. Springer Publ., 2005. 238 p.
  23. Wander A., Forstner R. Innovative fault detection, isolation and recovery strategies on-board spacecraft: state of the art and research challenges / Deutscher Luft-und Raumfahrtkongress, 2012. URL: <http://www.dglr.de/publikationen/2013/281268.pdf> (дата обращения: 31.01.2016).
  24. Fault-Detection, Fault-Isolation and Recovery (FDIR) Techniques. Utilize FDIR Design Techniques to provide for Safe and Maintainable On-Orbit Systems / NASA, pp. 1–6. Technique DFE-7. URL: [http://paso.esa.int/5\\_training\\_materials/training\\_11\\_fault%20techniques.pdf](http://paso.esa.int/5_training_materials/training_11_fault%20techniques.pdf) (дата обращения: 31.01.2016).
  25. Алексеев А.А., Кораблев Ю.А., Шестопалов М.Ю. *Идентификация и диагностика систем*. М.: Издательский центр «Академия», 2009. 352 с.
  26. Малышенко Ю.В. *Техническая диагностика* (конспект лекций), часть I. *Электронный ресурс*: [http://abc.vvsu.ru/Books/Teh\\_diag/page0009.asp](http://abc.vvsu.ru/Books/Teh_diag/page0009.asp) (дата обращения: 31.01.2016).

#### References

1. Brovkin A.G., Burdygov B.G., Gordiyko S.V. i dr. *Bortovye sistemy upravleniya kosmicheskimi apparatami*. Pod red. professora A.S. Syrova [The onboard systems of spacecraft control. Ed.: Professor A.S.]. M.: Izd-vo MAI-PRINT [Moscow: Publishing house of MAI-PRINT]. 2010. 304 p.
2. Zavedeev A.I., Kovalev A.Yu. Diagnostika sostoyaniya i printsipy povysheniya otkazoustoychivosti bortovoy sistemy upravleniya kosmicheskogo apparata [Diagnosis of fault tolerance and the principles of the onboard control system of the spacecraft]. *Elektronnyy zhurnal «Trudy MAI»* [Electronic magazine «Works MAI»]. 2012, no. 54, pp. 1–10.
3. Iyudu K.A. *Nadezhnost, kontrol i diagnostika vychislitelnykh mashin i sistem: uchebnoe posobie dlya vuzov* [Reliability, control and diagnostics of computers and systems: a manual for schools]. M.: Vysshaya shkola [Moscow: Publishing house «Higher school»]. 1989. 216 p.
4. Mikrin Ye.A. *Bortovye komplekсы upravleniya kosmicheskimi apparatami i proektirovanie ikh*

- programmnoy obespecheniya* [Board control spacecraft and designing their software]. M.: Izd. MGTU im. N.E. Bauman [Moscow: Publisher MSTU of N.E. Bauman]. 2003. 336 p.
5. Mikrin Ye.A. *Bortovye komplekсы upravleniya kosmicheskimi apparatami: uchebnoe posobie* [Board control spacecraft: a tutorial]. M.: Izd. MGTU im. N.E. Bauman [Moscow: Publisher MSTU of N.E. Bauman]. 2014. 245 p.
  6. Orlov S.A., Tsilker B.Ya. *Organizatsiya EVM i sistem: uchebnik dlya vuzov. 3-e izd* [Organization of computers and systems: a textbook for high schools. 3rd ed.]. SPb.: Piter [St. Petersburg: Publishing house «Peter»]. 2014. 688 p.
  7. Umnov A.A. *Proektirovanie bortovykh kompleksov upravleniya: tekst lektsiy SPb GUAP* [Design-board control: text of lectures at St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation]. SPb.: Izdatelstvo «Sankt-Peterburg» [ St. Petersburg: Publishing house «Sankt-Peterburg»]. 2000. 59 p.
  8. Kharchenko V., Yurchenko Yu. *IOTS-podkhod: analiz variantov struktur otkazoustoychivyykh bortovykh kompleksov pri ispolzovanii elektronnykh komponentov Industry* [IOTS-approach: analysis of the options for the structure of fault-tolerant systems using the onboard electronic components Industry]. Available at: <http://catalog.gaw.ru/index.php?id=991&page=document> (Date of the address: 31.01.2016).
  9. Savkin L.V. *O reshenii zadach bortovogo diagnostirovaniya kosmicheskikh apparatov s pomoshchyu rekonfiguriruemyykh vychislitelnykh sistem. Tekhnicheskije nauki – ot teorii k praktike. Sbornik statey po materialam XXXIX mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii* [About the solution of tasks of onboard diagnosing of spacecrafts by means of reconfigurable computing systems. Technical science – from the theory to practice. Collection of articles on materials XXXIX international scientific-practical conference]. Novosibirsk: Izdatelstvo «SIBAK» [Novosibirsk: Publishing house «SIBAK»]. 2014, no. 10 (35), pp. 79–88.
  10. Savkin L.V. *Predvaritelnoe ranzhirovanie signaturnyykh dannykh pri organizatsii mnogourovnevnogo diagnostirovaniya bortovogo kompleksa upravleniya kosmicheskogo apparata* [Preliminary ranging of signature data in case of spacecraft onboard control complex multi-level diagnosing]. *Informatsionno-izmeritelnye i upravlyayushchie sistemy* [Information measuring and controlling systems]. 2015, no. 12, pp. 34–40.
  11. Savkin L.V. *Ranzhирование vzaimozavisimyykh peremennykh tekhnicheskogo sostoyaniya bortovogo kompleksa upravleniya kosmicheskogo apparata pri formirovani optimalnoy diagnosticheskoy modeli v rekonfiguriruemoy sisteme funktsionalnogo kontrolya i diagnostiki*. Vosmoy Mezhdunarodnyy Aerokosmicheskyy Kongress. Tezisy dokladov [Ranging of interdependent variables technical condition in spacecraft onboard control complex the when forming optimum diagnostic model in reconfigurable functional monitoring and diagnostics system. Eighth International Aerospace Congress. Theses of reports]. M.: AIR [Moscow: Publishing «AIR»]. 2015, pp. 180–181.
  12. Savkin L.V., Shirshakov A.Ye., Novichkov V.M. *O grafakh bolshikh razmernostey otnositelno vydelennogo uchastka, vznikayushchikh pri formirovani diagnosticheskikh modeley v rekonfiguriruemom vychislitelnom pole sistemy funktsionalnogo kontrolya i diagnostiki bortovogo kompleksa upravleniya kosmicheskogo apparata* [About the big graphs dimensionalities of rather selected section arising when forming diagnostic models in a reconfigurable computing field of spacecraft onboard control complex functional monitoring and diagnostics system]. *Elektronnyy zhurnal «Nauka i obrazovanie»*, MGTU im. N.E. Bauman [Electronic journal «Science and Education», MSTU of N.E. Bauman]. 2015, no. 3, pp. 85–101. URL: <http://technomag.edu.ru/doc/759301.html> (Date of the address: 31.01.2016).
  13. Savkin L.V., Shirshakov A.Ye., Novichkov V.M. *Postroenie rekonfiguriruemoy sistemy funktsionalnogo kontrolya i diagnostiki bortovogo kompleksa upravleniya kosmicheskogo apparata* [Creation of reconfigurable system functional monitoring and diagnostics of the onboard complex to control of the spacecraft]. *Aviakosmicheskoe priborostroenie* [Aerospace Instrument-Making]. 2015, no. 6, pp. 8–13.
  14. Savkin L.V., Makarov A.S. *About diagnostic support of onboard equipment of aircraft on the basis of reconfigurable computing systems / Global Science and Innovation: materials of the III International Scientific Conference, Chicago, October 23–24th, 2014 / Publishing office Accent Graphics communications. Chicago, USA. 2014, pp. 357–361.*
  15. Savkin L.V., Shirshakov A.E., Novichkov V.M., Klochko O.S., Makarov A.S. *The hardware implementation of diagnostic algorithms for onboard systems of aircraft on the basis of reconfigurable computing structures / Science, Technology and Higher Education: materials of the VI International research and practice conference, Westwood, November 12–13th, 2014 / Publishing office Accent Graphics communications. Westwood, Canada. 2014, pp. 410–415.*
  16. Savkin L.V., Klochko O.S., Makarov A.S. *The introduction logic arifmetical redundance at low hardware level in the reconfigurable system monitoring and diagnostics of the spacecraft. European Science and Technology: materials of the IX international research and practice conference, Munich, December 24–25th, vol. II., 2014 / Publishing office Vela Verlag Waldkraiburg. Munich, Germany, 2014, pp. 436–442.*
  17. Savkin L.V., Klochko O.S., Makarov A.S. *About the adaptive redistribution topology of logic arifmetical communications of a computing field in the reconfigurable system monitoring and diagnostics for onboard complex to control of the spacecraft / European Conference on Innovations in Technical and Natural Sciences. Proceedings of the 5th International scientific conference (December 23, 2014). «East West» Association*

- for Advanced Studies and Higher Education GmbH. Vienna. 2014, pp. 76–84.
18. Savkin L.V. Self-testing fixed topology of basic diagnostic models in the reconfigurable computing field of system the functional monitoring and diagnostics an onboard complex to control of the spacecraft / The First European Conference on Informational Technology and Computer Science. Proceedings of the conference (March 3, 2015). «East West» Association for Advanced Studies and Higher Education GmbH. Vienna. 2015, pp. 64–69.
  19. Kalyaev I.A., Levin I.I., Semernikov Ye.A., Shmoylov V.I. *Rekonfiguriruemye multikonveyernye vychislitelnye struktury, 2-e izd* [Reconfigurable computing structures multikonveyernye, 2nd ed.]. Rostov-na-Donu: Izd-vo YuNTs RAN [Rostov-on-Don: Publishing house of YuNTs Russian Academy of Sciences]. 2009. 344 p.
  20. Kataev O.V. Ob odnom podkhode k postroeniyu otkazoustoychivyykh bortovyykh mnogoprotsessornykh vychislitelno-upravlyayushchikh sistem [About one approach to creation of fault-tolerant onboard multiprocessor computing managing directors systems]. *Iskustvennyy intellekt* [Artificial intelligence]. 2008, no. 4, pp. 538–544.
  21. Hauck S. Reconfigurable computing. The theory and practice of FPGA-based computation. Morgan Kaufmann Publ., 2007. 944 p.
  22. Gokhale M., Graham P.S. Reconfigurable Computing – Accelerating Computation with Field-Programmable Gate Arrays. Springer Publ., 2005. 238 p.
  23. Wander A., Forstner R. Innovative fault detection, isolation and recovery strategies on-board spacecraft: state of the art and research challenges / Deutscher Luft-und Raumfahrtkongress, 2012. URL: <http://www.dglr.de/publikationen/2013/281268.pdf> (дата обращения: 31.01.2016).
  24. Fault-Detection, Fault-Isolation and Recovery (FDIR) Techniques. Utilize FDIR Design Techniques to provide for Safe and Maintainable On-Orbit Systems / NASA, pp. 1–6. Technique DFE-7. URL: [http://paso.esa.int/5\\_training\\_materials/training\\_11\\_fault%20techniques.pdf](http://paso.esa.int/5_training_materials/training_11_fault%20techniques.pdf) (Date of the address: 31.01.2016).
  25. Alekseev A.A., Korablev Yu.A., Shestopalov M.Yu. *Identifikatsiya i diagnostika system* [Identification and diagnostics of systems]. M.: Izdatelskiy tsentr «Akademiya» [Moscow: Publishing center «Academy»]. 2009. 352 p.
  26. Malysenko Yu.V. *Tekhnicheskaya diagnostika* (konспект lektsiy), chast I [Technical Diagnostics (lecture notes), part I]. Available at: [http://abc.vvsu.ru/Books/Teh\\_diag/page0009.asp](http://abc.vvsu.ru/Books/Teh_diag/page0009.asp) (Date of the address: 31.01.2016).

## Информация об авторе

**Савкин Леонид Васильевич**, соискатель, специалист 1-й категории Научно-исследовательского отдела № 1  
E-mail: android4.1@mail.ru  
Публичное акционерное общество «Радиофизика»  
125363, Российская Федерация, Москва, ул. Героев-Панфиловцев, д. 10

## Information about the author

**Savkin Leonid Vasilyevich**, Competitor, Expert 1<sup>st</sup> Category of Research Department № 1  
E-mail: android4.1@mail.ru  
Public Joint Stock Company «Radiofizika»  
125363, Russian Federation, Moscow, Geroyev-Panfilovtsev Str., 10

## НОВОСТИ

**Модернизация АСУТП установки комплексной подготовки нефти НГДУ «Азнакаевскнефть»**

Выполнены проектные работы по техническому перевооружению подсистемы противоаварийных защит (ПАЗ) блока стабилизации нефти установки комплексной подготовки нефти НГДУ «Азнакаевскнефть».

*Нефтегазодобывающее управление «Азнакаевскнефть» является структурным подразделением одной из крупнейших российских нефтяных компаний ПАО «Татнефть».*

С целью исполнения предписания «Ростехнадзора» в НГДУ «Азнакаевскнефть» принято решение о дооснащении блока стабилизации нефти дополнительной запорной арматурой, которая позволит отключать его от технологической схемы площадки УКПН при превышении измеряемыми параметрами значений заданных уставок.

Для повышения надежности разрабатываемой системы ПАЗ блока стабилизации в проекте предусмотрено 100 % «горячее» резервирование контроллеров.

Полномасштабная АСУТП установки комплексной подготовки нефти «Азнакаевскнефть» на базе **программно-технического комплекса ПТК КРУГ-2000®** (ПТК КРУГ-2000®) внедрена фирмой «КРУГ» в 2005 г. Система обеспечивает комплексное решение задач по контролю, управлению, защите и диагностике технологического оборудования, длительной безаварийной работы оборудования и его экономичной эксплуатации.

НПФ «КРУГ»

Тел.: (8412) 499-775 (многоканальный)

Факс (8412) 556-496

E-mail: [krug@krug2000.ru](mailto:krug@krug2000.ru)

[www.krug2000.ru](http://www.krug2000.ru)