



УНИВЕРСИТЕТ ИТМО

СБОРНИК ТРУДОВ



ВСЕРОССИЙСКОГО
КОНГРЕССА
МОЛОДЫХ УЧЕНЫХ

ТОМ 2



Санкт-Петербург

2016

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

**САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ ИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ, МЕХАНИКИ И ОПТИКИ**

**Сборник трудов
V Всероссийского конгресса молодых
ученых**

Том 2



УНИВЕРСИТЕТ ИТМО

Санкт-Петербург

2016

Сборник трудов V Всероссийского конгресса молодых ученых. Том 2. – СПб.: Университет ИТМО, 2016. – 273 с.

В издании «Сборник трудов V Всероссийского конгресса молодых ученых» публикуются работы, представленные в рамках V Всероссийского конгресса молодых ученых и XIII Всероссийской межвузовской конференции молодых ученых, которая состоялась 12–15 апреля 2016 года в Санкт-Петербургском национальном исследовательском университете информационных технологий, механики и оптики.

ISBN 978-5-7577-0537-8

ISBN 978-5-7577-0538-5



УНИВЕРСИТЕТ ИТМО

Университет ИТМО – ведущий вуз России в области информационных и фотонных технологий, один из немногих российских вузов, получивших в 2009 году статус национального исследовательского университета. С 2013 года Университет ИТМО – участник программы повышения конкурентоспособности российских университетов среди ведущих мировых научно-образовательных центров, известной как проект «5 в 100». Цель Университета ИТМО – становление исследовательского университета мирового уровня, предпринимательского по типу, ориентированного на интернационализацию всех направлений деятельности.

© Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, 2016

© Авторы, 2016

Литература

1. Tolstoba N.D., Saitgalina A.K., Abdula P.A., Butova D.V. Student research laboratory for optical engineering // Proceedings of SPIE. – 2015. – V. 9793. – P. 97931Y.
2. Абдула П.А., Бутова Д.В., Вялых М.А., Кочнев К.А., Орехова М.К., Саитгалина А.К., Самаркин Г.М., Толстоба Н.Д. Развитие студенческой научной лаборатории оптотехники // Сб. трудов IV Всероссийского конгресса молодых ученых. – 2015. – С. 7–10.
3. Curticean D. University for Children – The Magic of Light // Proc. of SPIE. – 2009. – V. 9666. – P. 966604-1.
4. Townes C.H. How the Laser Happened, Adventures of a Scientist. – Oxford University Press, 1999. – 200 p.

УДК 004.031.6

АРХИТЕКТУРЫ С ЛОГИЧЕСКИМ ПЕРЕПЛЕТЕНИЕМ В РЕКОНФИГУРИРУЕМОЙ СИСТЕМЕ КОНТРОЛЯ И ДИАГНОСТИКИ БОРТОВОГО КОМПЛЕКСА УПРАВЛЕНИЯ КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА

Л.В. Савкин

Работа посвящена разработке и исследованию эффективных способов повышения надежности функционирования ранее предложенной реконфигурируемой системы контроля и диагностики бортового комплекса управления космического аппарата. Исследован подход, связанный с построением в составе диагностических каналов избыточных архитектур с логическим переплетением. Показано, что наиболее целесообразными для построения архитектур с логическим переплетением являются фрагменты единого реконфигурируемого вычислительного поля системы контроля и диагностики, реализующие выходные буферные устройства каналов обработки диагностической информации.

Ключевые слова: бортовой комплекс управления, контроль, диагностика, диагностический канал, избыточность, реконфигурируемое вычислительное поле, логика с переплетением, аппаратная архитектура.

Введение. Важной особенностью ранее предложенной [1] реконфигурируемой системы контроля и диагностики (СКД) является преимущественно аппаратная реализация контрольно-диагностических алгоритмов бортового комплекса управления космического аппарата (БКУ КА) на базе выделенных фрагментов реконфигурируемого вычислительного поля (РВП). В реконфигурируемой СКД БКУ КА также предусмотрена возможность восстановления вышедших из строя контролируемых промежуточных участков (архитектур) обработки вектора управляющей информации БКУ Y путем формирования «замещающей» аппаратной архитектуры непосредственно в РВП СКД. Реализация РВП, в свою очередь, основана на различных способах формирования единой составной архитектуры, выполненной на базе нескольких ПЛИС класса FPGA: мультимикроконвейерные и мультимакроконвейерные архитектуры [2, 3], принцип вложенных матричных наборов, открытые масштабируемые архитектуры и др.

В настоящей работе исследовались аппаратно-программные подходы по повышению надежности функционирования реконфигурируемой СКД БКУ КА. Ввиду того, что все основные функциональные подсистемы СКД реализуются преимущественно аппаратным образом в составе единого РВП СКД, то вполне естественным шагом в дальнейшем усовершенствовании СКД БКУ является использование низкоуровневой избыточности на уровне конфигурируемых логических

блоков (КЛБ) [4] с целью построения отказоустойчивых архитектур непосредственно в РВП. В качестве одного из возможных вариантов повышения отказоустойчивости СКД рассматривается подход, основанный на применении в едином РВП избыточных архитектур с логическим переплетением [5].

Цель работы – разработка и исследование способов повышения надежности реконфигурируемой СКД, основанных на построении локальных архитектур РВП СКД с логическим переплетением.

Основные задачи, решаемые в настоящей работе для достижения поставленной цели:

- рассмотреть возможности применения аппаратно-программных подходов по повышению надежности реконфигурируемой СКД БКУ КА, связанных с использованием в составе единого РВП локальных архитектур (функциональных фрагментов) с логическим переплетением;
- произвести общий анализ достоинств и недостатков рассматриваемого подхода в целом;
- оценить целесообразность применения данного подхода в рамках реконфигурируемой СКД БКУ КА;
- выделить области применимости данного подхода в составе функциональных архитектур РВП СКД с указанием конкретных базовых фрагментов РВП, реализующих контрольно-диагностическое обеспечение БКУ КА.

Избыточные архитектуры с логическим переплетением. Архитектуры с логическим переплетением могут быть получены за счет введения слоев из избыточных дублирующих элементов (в данном случае – КЛБ), связи между которыми устанавливаются в соответствии с определенными правилами. На рис. 1 приводится пример преобразования исходной комбинационной схемы в схему с логическим переплетением, за основу которого был взят чуть более сложный пример, приводившийся в пособии [5].

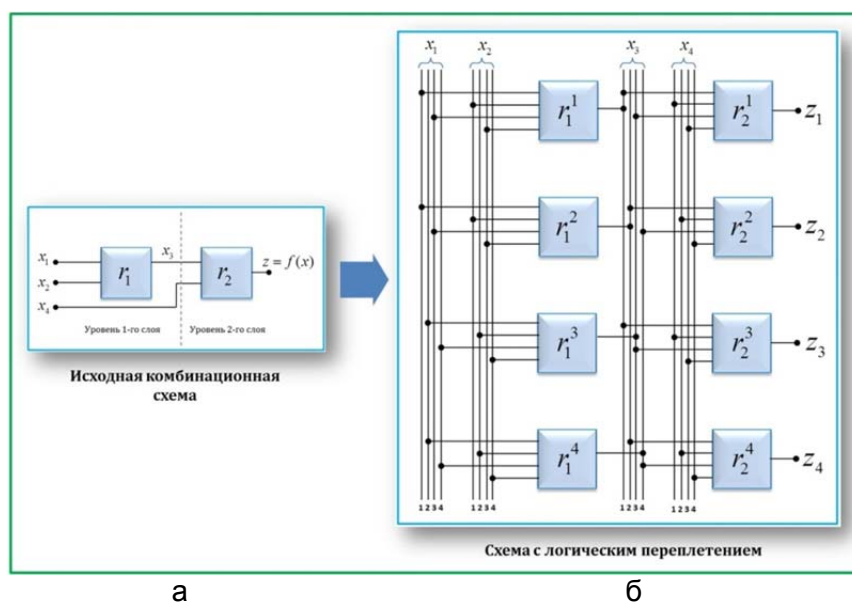


Рис. 1. Принцип формирования схемы с логическим переплетением

Из рисунка видно, что на предварительном этапе составления схемы с логическим переплетением, в исходной схеме (рис. 1, а), реализующей булеву функцию $z = f(x) = f(x_1, x_2, x_4)$, выделяются два уровня, которые затем будут преобразованы в слои (рис. 1, б). Наиболее распространенным способом формирования логики с переплетением является «четверенная логика, способная исправить однократные

ошибки и часть ошибок более высокой кратности» [5]. При этом, в пособии [5] также отмечается, что от каждого элемента слоя сигналы поступают только на два элемента последующего слоя (а не на четыре!), что в общем случае является отличительной чертой данного подхода от применения многослойных мажоритарных схем, использующих в основном полносвязные схемы соединения элементов между слоями. В данном случае правила, по которым были назначены связи между элементами архитектуры с логическим переплетением, представлены в таблице.

Таблица. Правила назначения связей для межслойных логических переплетений (для рис. 1)

Порядковый номер вывода	Связи с первым слоем		Связи со вторым слоем	
	x_1	x_2	x_3	x_4
1	1, 2	1, 2	1, 3	1, 3
2	3, 4	3, 4	2, 4	2, 4
3	1, 2	1, 2	1, 3	1, 3
4	3, 4	3, 4	2, 4	2, 4

Даже из данного простейшего примера видно, что процесс формирования схемы (или архитектуры) с логическим переплетением в целом является довольно трудоемким и всегда зависит от особенностей исходной комбинационной схемы, т.е. от ее изначальной структурно-функциональной сложности.

Формально данную процедуру можно описать следующим образом. Пусть имеется исходная комбинационная схема K , которая реализует аппаратным образом в составе РВП СКД некоторую функцию $z = f(x) = f(x_1, x_2, x_3, \dots, x_k)$. Этой функции всегда можно поставить в соответствие некоторый граф $G = G(X, R)$, в котором $X = \{x_1, x_2, \dots, x_k (\doteq z)\}$ – множество ребер графа G , $R = \{r_1, r_2, \dots, r_n\}$ – множество КЛБ-вершин, реализующих базовые логические или арифметические операции $r_i, i = \overline{1, n}$.

Для исходной комбинационной схемы это соответствие можно записать как

$$z = f(x) = f(x_1, x_2, x_3, \dots, x_k) \Leftrightarrow G(X, R),$$

причем, характер направленных связей $x_j, j = \overline{1, k}$ нас в данном случае не интересует, и именно поэтому речь здесь идет о графе G , а не об орграфе. Четырехкратную избыточность обозначим символом $\overset{|4}{\square}$, тогда граф архитектуры с логическим переплетением может быть представлен зависимостью вида

$$G^{\overset{|4}{\square}} = G(X^{\overset{|4}{\square}}, R^{\overset{|4}{\square}}),$$

где $X^{\overset{|4}{\square}}$ – четырехкратное множество ребер графа $G^{\overset{|4}{\square}}$, а $R^{\overset{|4}{\square}}$ – четырехкратное множество его КЛБ-вершин.

В этом случае значение функции на выходе архитектуры с логическим переплетением $\overset{|4}{f}(x)$, будет определяться графом $G^{\overset{|4}{\square}}$, что, в свою очередь, можно записать как

$$\overset{|4}{f}(x) \Rightarrow G(X^{\overset{|4}{\square}}, R^{\overset{|4}{\square}}) = \left(\begin{array}{c} \left[\begin{array}{cccc} r_1^1 & r_2^1 & r_3^1 & \dots & r_n^1 \\ r_1^2 & r_2^2 & r_3^2 & \dots & r_n^2 \\ r_1^3 & r_2^3 & r_3^3 & \dots & r_n^3 \\ r_1^4 & r_2^4 & r_3^4 & \dots & r_n^4 \end{array} \right] \times \left[\begin{array}{cccc} \lambda_{11} \cdot x_1^1 & \lambda_{12} \cdot x_2^1 & \lambda_{13} \cdot x_3^1 & \dots & \lambda_{1k} \cdot x_k^1 \\ \lambda_{21} \cdot x_1^2 & \lambda_{22} \cdot x_2^2 & \lambda_{23} \cdot x_3^2 & \dots & \lambda_{2k} \cdot x_k^2 \\ \lambda_{31} \cdot x_1^3 & \lambda_{32} \cdot x_2^3 & \lambda_{33} \cdot x_3^3 & \dots & \lambda_{3k} \cdot x_k^3 \\ \lambda_{41} \cdot x_1^4 & \lambda_{42} \cdot x_2^4 & \lambda_{43} \cdot x_3^4 & \dots & \lambda_{4k} \cdot x_k^4 \end{array} \right]^T \end{array} \right),$$

(2)

где символ \times определяет произведение матриц, связанное с установлением только двух связей между элементами α -го слоя и $(\alpha+1)$ -го слоя по правилу, задающемуся матрицей $\lambda = \|\lambda_{pj}, p = \overline{1,4}, j = \overline{1,k}\|$, элементы λ_{pj} которой могут принимать значение только нуля или единицы.

Иногда архитектуру с логическим переплетением удобно описывать с помощью объединенного графа (или уже орграфа) G^{l4} вида

$$G^{l4} = G_1(X_1^{l4}, R_1^{l4}) \cup G_2(X_2^{l4}, R_2^{l4}) \cup \dots \cup G_w(X_w^{l4}, R_w^{l4}) = \bigcup_{\alpha=1}^w G_\alpha(X_\alpha^{l4}, R_\alpha^{l4}),$$

где $G_\alpha(X_\alpha^{l4}, R_\alpha^{l4})$ – граф, описывающий α -ый слой архитектуры с логическим переплетением, $\alpha = \overline{1, w}$ – порядковый номер слоя в архитектуре с логическим переплетением.

В пособии [5] также приводится формула для приближенной оценки вероятности безотказной работы избыточных схем с логическим переплетением, учитывающая одновременно максимальное число ошибок, которые могут исправляться в данного типа схемах.

Этот подход в целом вполне эффективен при реализации сравнительно простых комбинационных схем на базе подходящих с точки зрения архитектуры (островная, иерархическая, асимметричная и др.) ПЛИС класса FPGA. Недостатком в данном случае является значительная сложность в предварительных расчетах схемы, связанных как с выбором правил организации межслойных связей, так и способов декомпозиции исходной архитектуры. В то же время в процессе усложнения исходной комбинационной схемы наиболее предпочтительным вариантом построения избыточной отказоустойчивой архитектуры является реализация многослойных мажоритарных схем резервирования, также требующих предварительной декомпозиции базовой архитектуры. Однако в последнем случае сами принципы декомпозиции исходной архитектуры являются довольно универсальными по сравнению с процедурами, требуемыми при организации логики с переплетением для конкретных комбинационных схем.

Формирование диагностических каналов в РВП СКД. Ввиду высокой степени конфигурационной сложности базовых архитектур РВП СКД, самым предпочтительным вариантом, дающим возможность практически реализовать архитектуру в РВП с логическим переплетением, является буферное устройство (БУ) (рис. 2).

БУ входит в состав каналов обработки диагностической информации (КОДИ) области реконфигурируемых измерительных каналов (РИК) РВП СКД и отводится для согласования данных о результатах диагностирования БКУ h с внешним (относительно РВП СКД) входным устройством базы данных (БД) классификатора аппаратно-программных неисправностей БКУ КА, которое на рис. 2 не представлено.

Такое решение обусловлено, прежде всего, сравнительно простой комбинационной схемой БУ, в состав которого, как представлено на рис. 2, введен еще и дополнительный мажоритарный орган (МО), реализующий правило «три из четырех». Применение такого МО также советуется применять и в [5] с целью получения одного выходного сигнала $z = f(x)$ от четырехканальной архитектуры с логическим переплетением.

Каждый независимый КОДИ через БУ осуществляет сопоставление регистрируемых данных с эталонными данными, хранящимися в пополняемой БД классификатора аппаратно-программных неисправностей подсистем БКУ КА. На

основе оценки параметров вектора данных W определяются как глубина неисправности или отказа той или иной подсистемы БКУ КА, так и эффективность выбранного алгоритма обработки диагностической информации в КОДИ [1, 6].

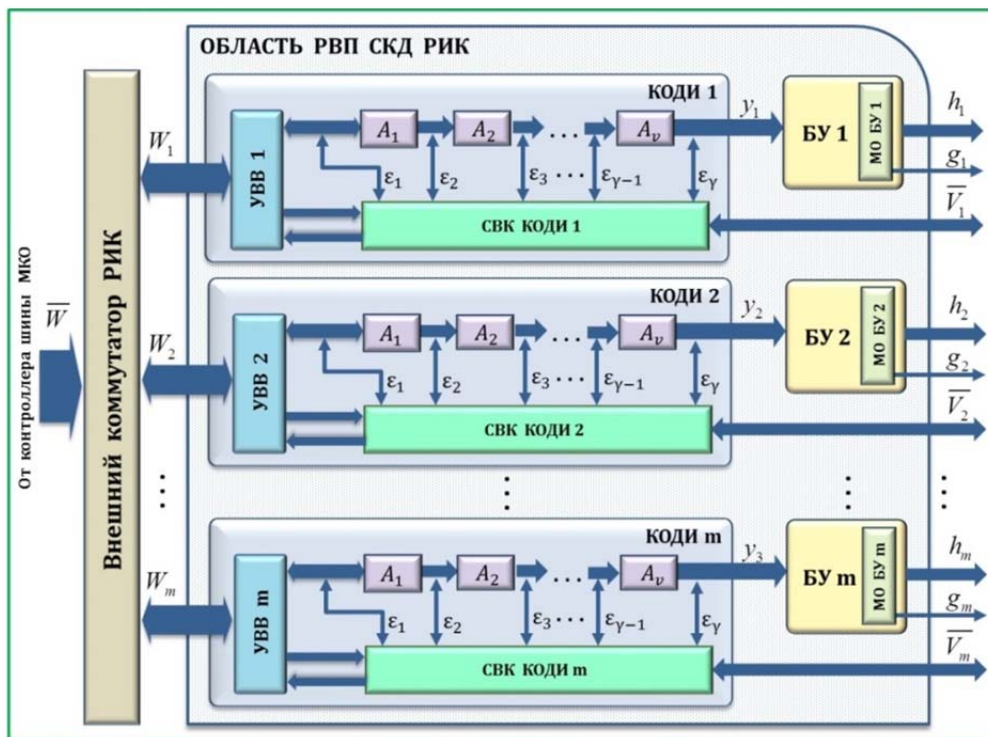


Рис. 2. Область РИК, в которой задействованы архитектуры БУ с логическим переплетением

Рис. 2 иллюстрирует также и каскадную структурную организацию общей архитектуры каждого КОДИ, обеспечивающую доступ к промежуточным архитектурам (или участкам) цифровой обработки информации A_1, A_2, \dots, A_v с помощью схемы встроенного контроля (СВК) через постоянный набор каналов двустороннего (контроль и тест) доступа $\epsilon_1, \epsilon_2, \dots, \epsilon_\gamma$. Вся совокупность данных, используемых при организации двустороннего доступа к СВК представляют собой вектор V . По набору параметров $\{g_1, g_2, \dots, g_m\}$ осуществляется оценка загруженности МО каждого из КОДИ области РИК РВП, а также регистрируются ошибки, возникающие при реализации логики «три из четырех». Все данные в совокупности $\langle h, g, V \rangle$ определяют общую конфигурацию $Q = f\langle h, g, V, t \rangle$ единого РВП СКД в моменты времени t .

Для регистрации сбоев и любых несоответствий в идентичных фрагментах РВП СКД в большинстве каналов обработки информации попарно в соответствии с алгоритмом очередности реализуется простейшая операция

$$F_{A_1} | F_{A_2} = F_{A_1}(x, t) \oplus F_{A_2}(x, t),$$

которая в автоматическом режиме запускает режим «временного снятия» архитектур с зарегистрированной ошибкой идентичности из функционального состава РВП СКД и включает углубленное (вплоть до определения порядкового номера КЛБ) самотестирование [7] «подозрительных» функциональных фрагментов РВП.

Таким образом, повышение надежности функционирования реконфигурируемой СКД, основанное на применении архитектур с логическим переплетением в составе единого РВП, может быть целесообразным только при реализации архитектур БУ с МО на выходах каждого КОДИ. В остальных случаях данный подход является крайне нежелательным ввиду приведенных ранее аргументов.

Выводы. В работе были рассмотрены вопросы, связанные с повышением надежности функционирования ранее предложенной реконфигурируемой СКД БКУ КА. В качестве основного способа повышения надежности СКД исследовался подход, связанный с построением в составе диагностических каналов избыточных архитектур с логическим переплетением.

Из поставленной цели и сформулированных для ее достижения основных задач можно заключить следующее:

1. рассмотрена возможность повышения надежности функционирования реконфигурируемой СКД БКУ КА, связанная с использованием в составе единого РВП штатных функциональных архитектур с логическим переплетением;
2. произведен общий анализ достоинств и недостатков предложенного подхода. В качестве основного достоинства данного подхода необходимо отметить его эффективность при реализации простых комбинационных схем. В качестве существенных недостатков подхода необходимо подчеркнуть значительную сложность и трудоемкость, связанные с проведением предварительных расчетов исходных комбинационных схем: выбор правил организации межслойных связей, декомпозиция исходной архитектуры и т.п. Также в качестве важного недостатка применения архитектур с логическим переплетением является (в большинстве случаев) необходимость введения дополнительного МО, что в итоге делает данное решение крайне нерациональным с точки зрения возможности применения классической многослойной схемы с мажоритарным резервированием;
3. произведена оценка целесообразности применения данного подхода в рамках реконфигурируемой СКД БКУ КА. Был проведен сравнительный анализ возможных вариантов аппаратного построения в РВП СКД каналов обработки диагностической информации, использующих многослойную логику с переплетением. Показано, что наиболее целесообразными для построения архитектур с логическим переплетением являются фрагменты единого РВП СКД, реализующие выходные БУ КОДИ области РИК РВП.

В настоящее время продолжаются исследования, связанные с применением других подходов по повышению надежности функционирования реконфигурируемой СКД БКУ КА.

Литература

1. 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.
2. Каляев И.А., Левин И.И., Семерников Е.А., Шмойлов В.И. Реконфигурируемые мультиконвейерные вычислительные структуры. – 2-е изд., перераб. и доп. – Ростов-на-Дону: Изд-во ЮНЦ РАН, 2009. – 344 с.
3. Nauck S. Reconfigurable computing. The theory and practice of FPGA-based computation. – Morgan Kaufmann Publ., 2007. – 944 p.
4. Уваров С.С. Проектирование реконфигурируемых отказоустойчивых систем на ПЛИС с резервированием на уровне ячеек // Автоматика и телемеханика. – 2007. – № 9. – С. 176–189.
5. Иьуду К. Надежность, контроль и диагностика вычислительных машин и систем: учеб. пособие для вузов. – М.: Высш. шк., 1989. – 216 с.
6. Алексеев А.А., Кораблев Ю.А., Шестопалов М.Ю. Идентификация и диагностика систем. – М.: Академия, 2009. – 352 с.

7. 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. – 2015. – P. 64–69.