

ИНСТИТУТ КОСМИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ  
РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК

ХIII КОНФЕРЕНЦИЯ МОЛОДЫХ УЧЁНЫХ  
**ФУНДАМЕНТАЛЬНЫЕ  
И ПРИКЛАДНЫЕ  
КОСМИЧЕСКИЕ  
ИССЛЕДОВАНИЯ**  
13–15 апреля 2016 года, ИКИ РАН, Москва

**СБОРНИК ТРУДОВ**

Под редакцией  
А.М. Садовского

Серия «Механика, управление и информатика»

МОСКВА  
ИКИ РАН  
2016

**The 13<sup>th</sup> Young Scientists Conference  
“Fundamental and Applied Space Researches”**

**IKI RAN, Moscow, April 13–15, 2016**

**Proceedings  
Ed. A. M. Sadovski**

The 13th Young Scientists Conference “Fundamental and applied space research” dedicated to the Cosmonautics Day, took place on 13–15 April, 2016, at the Space Research Institute of the Russian Academy of Sciences (web site of the conference <http://kmu.cosmos.ru>). Traditionally, the conference was arranged by the Scientific and Educational Centre of the Space Research Institute of the Russian Academy of Science. Students, postgraduates and young scientists (up to 35 year-old), connected with space and space research, participated in the conference. Once again the Conference has become the largest youth forum, dedicated to space physics. Within three days more than 100 reports were submitted. In “The Young Scientists Conference papers” you may find the selected conference participants articles. The collection is included in the Russian Science Citation Index.

**13-я Конференция молодых учёных  
«Фундаментальные и прикладные космические исследования»**

**ИКИ РАН, Москва, 13–15 апреля 2016 г.**

**Сборник трудов  
Под ред. А. М. Садовского**

13–15 апреля 2015 г. в ИКИ РАН состоялась XIII Конференция молодых учёных «Фундаментальные и прикладные космические исследования» (интернет-сайт конференции <http://kmu.cosmos.ru>), посвящённая Дню космонавтики. Конференция проводилась Научно-образовательным центром ИКИ РАН. В конференции принимали участие студенты, аспиранты и молодые учёные (до 35 лет), чья деятельность связана с космосом и космическими исследованиями. В очередной раз конференция стала самым крупным молодежным форумом, посвящённым космической физике. За три напряженных дня работы было представлено более 100 докладов. «Сборник трудов Конференции молодых ученых» содержит избранные статьи, написанные авторами докладов. Сборник включен в Российский индекс научного цитирования (РИНЦ).

Компьютерная вёрстка: *Комарова Н. Ю.*  
Дизайн обложки: *Захаров А. Н.*

Мнение редакции не всегда совпадает с точкой зрения авторов статей.  
Отдельные статьи даны в авторской редакции.  
Качество иллюстраций соответствует предоставленному авторами материалу.

Электронная версия сборника размещена на сайтах ИКИ РАН <http://www.iki.rssi.ru/print.htm>  
и Российской научной электронной библиотеки <http://elibrary.ru/>.

## ГРАФОАНАЛИТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ БОРТОВЫХ РЕГЕНЕРАТИВНЫХ ЭЛЕКТРОННЫХ СИСТЕМ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ

Л. В. Савкин

ПАО «Радиофизика»

В работе исследуются проблемы графоаналитического моделирования ранее предложенных бортовых регенеративных электронных систем космических аппаратов. В первой части работы дан краткий обзор графоаналитических методов моделирования реконфигурируемых вычислительных архитектур, подходящих к моделированию регенеративных электронных систем. Во второй части рассмотрены проблемные вопросы комбинаторных ограничений и оптимизации графоаналитических моделей регенеративных электронных систем, сформулирована проблема количественной оптимизации функциональных вершин графов. В третьей части рассмотрены основные способы регенерации фрагментов реконфигурируемого вычислительного поля с позиций введённых в настоящей работе понятий целевого и избыточного конфигурационных графов.

*Ключевые слова:* реконфигурируемое вычислительное поле, графоаналитическая модель, фрагмент, оргграф, избыточность, целевой граф, избыточный граф.

### ВВЕДЕНИЕ

Различные концепции реконфигурируемых вычислительных систем (РВС), реализуемые в большинстве известных случаев на базе программируемых логических интегральных схем (ПЛИС) класса FPGA (Field Programmable Gate Array) [Каляев и др., 2009; Nauck, 2007; Grout, 2008], позволяют сегодня исследовать качественно новые подходы в построении отказоустойчивой бортовой радиоэлектронной аппаратуры космических систем и комплексов. Одним из таких подходов является практическая реализация *регенеративных электронных систем* (РегЭС) [Савкин, 2015а], способных восстанавливать образующие её дискретные элементы на низком аппаратном уровне, т.е. уровне конфигурируемых логических блоков (КЛБ) [Уваров, 2007]. Локальное восстановление аппаратных архитектур РегЭС достигается за счёт *низкоуровневой избыточности* и *динамической реконфигурации* единого реконфигурируемого вычислительного поля (РВП), строящегося на базе интегрированной и однородной аппаратно-программной платформы, состоящей из нескольких ПЛИС FPGA. Данный большой класс электронных систем предлагается относить к *целеустремлённым отказоустойчивым системам* [Акофф, Эмери, 1974], характеризующимся способностью адаптировать собственную аппаратную архитектуру не только к информационной структуре решаемых задач [Каляев и др., 2009], но и к неисправностям и отказам, которые могут возникать в течение всего срока эксплуатации РегЭС. Более подробное обоснование причины отнесения РегЭС к классу целеустремлённых систем будет представлено в основной части данной работы.

Использование бортовых РегЭС в космических аппаратах (КА) позволит наиболее рационально использовать общий аппаратный ресурс служебных и целевых систем, что является особенно важным в виду наблюдаемой сегодня тенденции к интеграции [Грущанский, Дергачев, 2008; Давыдов, Репин, 1996] многих бортовых систем цифровой обработки данных в единые аппаратно-

программные комплексы и модули. Вместе с тем необходимо отметить, что сама концепция РегЭС представляет собой совокупность таких подходов по аппаратно-программной реализации бортовых систем КА, которые в значительной степени отличаются от традиционных подходов с применением микропроцессорных архитектур. Речь, в частности, идёт об использовании преимущественно однородных реконфигурируемых аппаратных архитектур, возможности практического применения которых предоставляют сегодня активно развивающиеся технологии ПЛИС.

Пожалуй, самую важную роль в формировании идеи РегЭС играют два обстоятельства, связанные с конкретными характеристиками ПЛИС, благодаря которым сегодня можно говорить о реализации подобного класса систем вообще.

Первым обстоятельством является *возможность парирования отказов в ПЛИС на уровне одного конфигурируемого логического блока* (КЛБ). Этим свойством обладают практически все известные на сегодняшний день радиационноустойчивые ПЛИС FPGA, причём данная характеристика в большинстве случаев достигается преимущественно технологическим путём.

Второе обстоятельство предполагает использование в РегЭС ПЛИС FPGA с возможностями *динамической реконфигурации архитектуры*, которым в последнее время посвящено немало интересных работ зарубежных исследователей. Безусловно, важную роль в построении РегЭС играют также и способы организации конфигурационной памяти, позволяющие реализовать режимы локальной либо полной реконфигурации архитектуры ПЛИС, и сам тип архитектуры ПЛИС (островная, иерархическая, асимметричная, комбинированная и др.), от которого зависят все её конфигурационные свойства, и многие другие параметры. Однако именно вышеотмеченные два обстоятельства служат отправной точкой, позволяющей говорить о практической реализации концепции РегЭС в целом.

В настоящей работе предлагается рассмотреть ключевые проблемы, связанные с вопросами структурного и функционального проектирования (моделирования) РегЭС.

## ЦЕЛЬ И ОСНОВНЫЕ ЗАДАЧИ

Ввиду значительной степени однородности аппаратных архитектур РегЭС, наиболее удобным способом изучения (по крайней мере, на первом этапе проектирования) их структурных и функциональных особенностей является *графоаналитическое моделирование*, причём преимущественно двумерное (планарное). Все графоаналитические модели РегЭС предполагают использование двух фундаментальных принципов структурно-функциональной организации архитектур вычислительных систем — *конвейерности* и *параллелизма*. Данные принципы составляют основу анализа, синтеза и оптимизации аппаратно-программных составляющих абсолютно всех известных на сегодняшний день вычислительных систем, включая однородные, систолические, кластерные, реконфигурируемые, мультikonвейерные, мультиклеточные и многие другие [Алексеев и др., 2005; Богданов и др., 2004; Каляев и др., 2009; Хорошевский, 2008; Шалыто, 2000]. Нередко в кругу специалистов по вычислительным си-

стемам, можно услышать фразу о том, что все из упомянутых выше типов вычислительных систем являются «названием разных сторон одного и того же». Данное выражение в какой-то степени является грубым подтверждением особой важности и универсальности принципов конвейерности и параллелизма, поскольку при более глубоком рассмотрении всех деталей, связанных с различиями между вышеназванными типами вычислительных систем, естественным образом происходит осознание и понимание того, что все пути сводятся именно к этим двум фундаментальным принципам.

Упомянутые выше принципы и ещё ряд других играют важнейшую роль в построении графоаналитических моделей РВС, к которым относятся и все типы РегЭС, рассмотренные в ранних работах [Савкин, 2015а, б; 2016].

*Цель работы* — исследование принципов аппаратно-программного построения и функционирования РегЭС на основе графоаналитических методов.

Для достижения поставленной цели предлагается решить следующие *основные задачи*:

- 1) анализ известных на сегодняшний день методов графоаналитического моделирования комбинационных схем, составляющих основу всех типов архитектур вычислительных систем, оперирующих в функциональном базисе булевых функций;
- 2) выбор наиболее подходящих подходов по анализу, синтезу и оптимизации архитектур вычислительных систем в рамках различных типов РегЭС;
- 3) рассмотрение ключевых проблемных вопросов, связанных с комбинаторными и топологическими ограничениями фрагментов РВП РегЭС, возникающими в режиме локальной и полной реконфигурации единого РВП;
- 4) оценка практических возможностей по оптимизации РегЭС с точки зрения повышения надёжности их функционирования в составе бортовых систем космических аппаратов;
- 5) исследование базовых принципов функционирования РегЭС на основе их комбинированных графоаналитических моделей.

В работе предлагается рассмотреть результаты общего графоаналитического моделирования РегЭС, которые можно будет использовать в разработке методов аппаратного синтеза функциональных и контролирующих сред РегЭС, реализуемых на базе единого РВП, включая методы их многоуровневого [Алексеев и др., 2009] контроля и диагностики.

## 1. ОБЩИЙ ПОДХОД В ГРАФОАНАЛИТИЧЕСКОМ МОДЕЛИРОВАНИИ РегЭС

### 1.1. Описание фрагментов РВП с помощью орграфов

Данный подход, ввиду своей простоты и универсальности, является одним из наиболее распространённых способов описания структурных и функциональных особенностей архитектур вычислительных систем. Он заключается в том, что любой выделенный фрагмент аппаратной архитектуры РВП РегЭС с условным порядковым номером  $i$  можно описать орграфом  $G_i = G_i(X_i, R_i)$ , где

$X_i = \{x_1, x_2, \dots, x_d\}$  — множество направленных рёбер (дуг) орграфа, определяющих связи между КЛБ, образующими  $i$ -ю архитектуру РВП  $R_i = \{r_1, r_2, \dots, r_e\}$  — множество функциональных КЛБ-вершин орграфа  $G_i$ , реализующих базовые логико-арифметические операции.

Если орграф  $G_i$  описывает только топологию между КЛБ-вершинами, и логико-арифметические функции КЛБ-вершин не заданы, то будем говорить о *структурном графе* фрагмента РВП. Если же учитываются и функции, реализуемые посредством КЛБ-вершин, то будем говорить о *функциональном графе* фрагмента РВП, или о *структурно-функциональном графе*. Понятно при этом, что любой функциональный граф всегда будет полностью отражать комбинационную схему (или её участок) рассматриваемого фрагмента РВП.

Составную архитектуру выделенных фрагментов РВП РегЭС удобно описывать с помощью объединения непересекающихся [Каляев и др., 2009] подграфов  $G_i, i = \overline{1, n}$ , каждый из которых соответствует её отдельному функциональному фрагменту. Данную графоаналитическую модель можно записать как

$$G_1(X_1, R_1) \cup G_2(X_2, R_2) \cup \dots \cup G_n(X_n, R_n) = \bigcup_{i=1}^n G_i(X_i, R_i). \quad (1)$$

С помощью объединённых графов (1) можно описывать не только локальные фрагменты РВП, но и представлять РВП в виде единого составного графа  $G^{\text{РВП}}$ . В этом случае справедлива запись

$$G^{\text{РВП}} = \bigcup_{i=1}^n G_i(X_i, R_i). \quad (2)$$

Изначально, до момента образования в РВП РегЭС аппаратных архитектур, орграф РВП  $G^{\text{РВП}}$  является пустым [Алексеев и др., 2005; Емеличев и др., 2015], поскольку не содержит ни одного ребра, т.е.  $G^{\text{РВП}} = G^{\text{РВП}}(R) = O_r$ ,  $R = \{r_1, r_2, \dots, r_e\}$ , так как  $X = \emptyset$ .

Введём теперь одно важное определение, касающееся всех методов аппаратной реализации алгоритмов на базе РВП РегЭС.

Если орграф  $G_i$  описывает аппаратную архитектуру в составе РВП, на которой реализуется некоторая булева функция  $f_i(x) = f_i(x_1, x_2, \dots, x_p)$ , то такую функцию будем называть *конфигурационной функцией*  $i$ -го фрагмента (аппаратной архитектуры) РВП РегЭС. Запишем это определение в виде формального преобразования

$$G_i = G_i(X_i, R_i) \Rightarrow f_i(x) = f_i(x_1, x_2, \dots, x_p),$$

которое в рамках всех графоаналитических моделей, описывающих функциональные фрагменты РВП РегЭС можно назвать взаимно-однозначным, т.е. имеет место быть и обратный переход от  $f_i(x)$  к  $G_i$ . С учётом (2), ту функцию, которая будет соответствовать графу  $G^{\text{РВП}}$ , будем называть *конфигурационной функцией* РВП РегЭС. Данное определение конфигурационной функции отличается от определения, предложенного в ранних работах [Савкин, 2015б, 2016]. Это уточнение является следствием разработки новых методов многоуровневой диагностики РегЭС и обуславливается, прежде всего, необходимостью формирования единого терминологического словаря для описания различных категорий отказоустойчивых систем на базе ПЛИС.

Уточнённое понятие конфигурационной функции используется при описании процедур регенерации фрагментов РВП РегЭС. Под *регенерацией*, в свою очередь, понимается *процесс* низкоуровневого восстановления одиночных (либо групповых) неисправностей функционально задействованных КЛБ, который достигается за счёт локальной либо полной реконфигурации РВП, направленной на функциональное замещение вышедшего из строя КЛБ (группы КЛБ) логическим блоком из состава избыточной резервной группы КЛБ. Процесс регенерации в РВП осуществляется в динамическом режиме, при этом архитектурой РВП предусмотрено равномерное распределение как задействованных в реализации функциональной архитектуры наборов КЛБ, так и резервных наборов КЛБ. Отдельные фрагменты (архитектуры) РВП предусматривают применение мажоритарных схем резервирования, образуя тем самым *квазистационарные архитектуры*. При этом приставка «квази» означает, что в случае исчерпывания мажоритарного соотношения исправен/неисправен в процессе эксплуатации РегЭС, вычислительный канал также может восстановиться за счёт реконфигурации РВП, т. е. за счёт процедуры регенерации.

Кроме того, одним из возможных вариантов восстановления полного фрагмента РВП с мажоритарной схемой резервирования является её «перенос» на резервный участок РВП, предусмотренный общей архитектурой единого РВП и его вычислительным ресурсом. Более подробно об основных способах регенерации будет сказано в третьем разделе данной статьи.

Необходимо коротко упомянуть ещё о ряде способов описания процессов функционирования РегЭС и РВС в целом, которые имеют непосредственное отношение к методам графоаналитического моделирования РегЭС.

## 1.2. Карты состояний РВП РегЭС

Поскольку все РегЭС являются цифровыми системами, то к ним применимы и все известные на сегодняшний день методы анализа и синтеза, характерные для данного типа дискретных систем. Помимо широко распространённых диаграмм (или карт) Вейча-Карно, к *картам состояний* можно отнести все табличные способы задания и представления данных о переходных процессах, происходящих в РегЭС. *Картой состояний* можно называть любое табличное (или матричное) представление информации как о структуре, так и о функциях рассматриваемой системы в дискретные моменты времени  $t_q$ . Сам термин «карты состояний» слишком обширен и встречается практически во всех областях науки и техники, имеющих дело с рассмотрением дискретных объектов, включая информацию о них.

Применительно к РегЭС и в особенности к их графоаналитическим моделям, примерами простейших карт состояний могут служить матричные способы задания графов, описывающих аппаратные архитектуры в выделенных фрагментах РВП. К этим способам относятся, прежде всего, матрицы смежности, матрицы инцидентности и матрицы изоморфности. С помощью них в случаях, когда граф  $G_i$  является графом малой размерности, довольно удобно описывать исправные и неисправные состояния КЛБ в фрагментах РВП, либо состояния фрагментов РВП РегЭС в общем.

Вместе с тем нередко прибегают к другим подходам, учитывающим вероятности переходов системы (или подсистем) из одного состояния в другое, и которые также имеют непосредственное отношение к графоаналитическим методам моделирования РегЭС.

### 1.3. Логико-вероятностные подходы и структурные схемы надёжности

В целом логико-вероятностные способы анализа дискретных систем и переходных процессов в них также довольно разнообразны и активно развиваются в настоящее время как в отношении применяемой в них предикатной логики, так и в рамках используемых в них вероятностных моделей.

Одним из довольно удобных логико-вероятностных способов анализа фрагментов РВП РегЭС являются *схемы функциональной целостности (СФЦ)* [Можаев, 1982; Мусаев, Gladkova, 2010]. Их удобство заключается в строгой ограниченности словаря алгебры логики, посредством которого с помощью графоаналитического моделирования можно исследовать функционирование сложных комбинационных схем. Особенно эффективно с помощью СФЦ описываются однородные вычислительные системы (ОВС), к которым, безусловно, относятся и РегЭС. Подход, основанный на использовании СФЦ, позволяет осуществлять оценку графов  $G_i$  на предмет наличия в них логико-арифметических коллизий, что в полной мере может быть использовано при верификации различных графоаналитических моделей РегЭС, а также при построении соответствующих этим моделям деревьев состояний и отказов. Кроме того, подход с применением СФЦ в значительной степени развит и в отношении методов оценки структурных схем надёжности.

Говоря об унифицированных методах анализа структурных схем надёжности, которые также находят широкое применение и в расчёте надёжности вычислительных систем, на практике во многих случаях используются и классические подходы, оперирующие с уравнением Колмогорова-Чепмена [Шкляр, 2009]. В таких графоаналитических моделях в качестве вершин орграфа рассматриваются уникальные состояния системы на высоком аппаратном уровне (к примеру, вычислительный модуль «Исправен»/«Неисправен»), а в качестве предикатных дуг используются интенсивности переходов одних состояний в другие.

На рис. 1 в качестве простейшего примера переходных состояний вычислительной системы на верхнем аппаратном уровне, представлен граф переходов общего состояния РегЭС.

В общем случае множество всех состояний  $S$  РегЭС можно разделить на два подмножества: подмножество исправных состояний  $S_1$ , в которых РегЭС функционирует удовлетворительно, и подмножество неисправных состояний  $S_0$ , в которых РегЭС неработоспособна. При этом,  $S_1 \subset S$ ,  $S_0 \subset S$ ,  $S = S_1 \cup S_0$ . На рис. 1 условно показано также третье состояние РегЭС — состояние регенерации РВП  $S_{\text{рег}}$ , которое является в некотором смысле обособленным, поскольку в различные моменты времени  $t$  может относиться либо к множеству  $S_1$ , т. е.  $S_{\text{рег}}(t) \subset S_1(t)$ , либо к множеству  $S_0$ , т. е.  $S_{\text{рег}}(t) \subset S_0(t)$ .

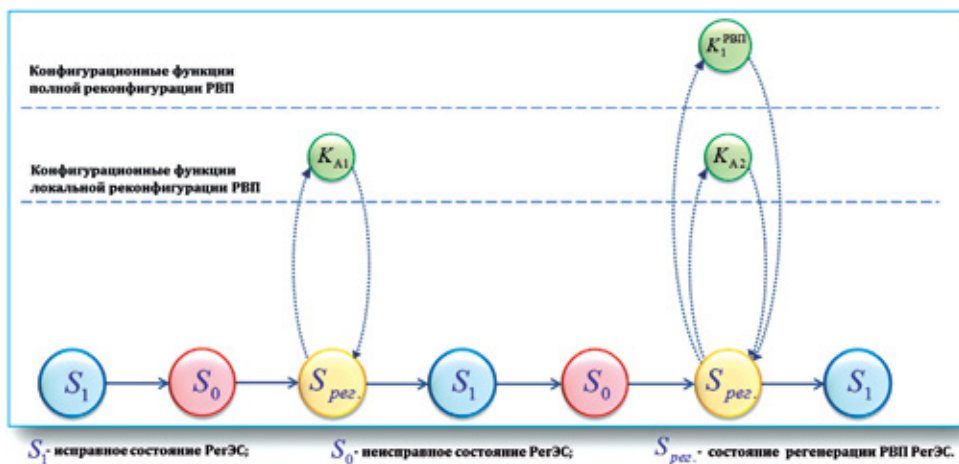


Рис. 1. Граф переходов общего состояния РВП ПерЭС

Малая эффективность методов анализа состояний подсистем верхнего аппаратного уровня ПерЭС с помощью уравнения Колмогорова-Чепмена обуславливается не только необходимостью оценки большого числа состояний системы, соответствующих множеству состояний  $S_{рег}$ . Она связана ещё и с тем, что при расчёте вероятностных характеристик состояний ПерЭС, необходимо точно знать к какому множеству ( $S_1$  или  $S_0$ ) принадлежит каждый элемент-состояние из множества  $S_{рег}$ . Эта задача представляет собой задачу многоуровневой диагностики РВП, решение которой осуществляется методами, соответствующими конкретным типам отказоустойчивых архитектур РВП ПерЭС. С точки зрения всех моделей ПерЭС, относящихся к оценке состояния системы на верхних аппаратных уровнях, этот подход в целом является весьма нелогичным и малоинформативным, поскольку не учитывает причинно-следственные связи на уровне КЛБ, приводящие к тому или иному состоянию ПерЭС на её верхних аппаратных уровнях. В тоже время этот подход может быть вполне приемлемым при исследовании структурных схем надёжности отдельных фрагментов РВП ПерЭС.

Все переходные процессы в состояниях ПерЭС всегда отражаются на конфигурационных функциях системы  $K_i(x, t) = f_i(x, t)$ , которые одновременно могут выступать в качестве индикаторов как локальных, так и полных структурно-функциональных изменений РВП. Это, в свою очередь, составляет отдельное направление исследований ПерЭС, которое в данной работе не рассматривается.

## 2. КОМБИНАТОРНЫЕ ОГРАНИЧЕНИЯ И ОПТИМИЗАЦИЯ ПерЭС

Все процессы адаптации аппаратной архитектуры РВП к неисправностям и отказам на его участках носят в большинстве случаев чисто комбинаторный характер. Например, выполнение в РВП ПерЭС процедур регенерации есть не что

инное, как решение таких классических комбинаторных задач, как задача о коммивояжёре, задача о назначениях, задача поиска минимального остовного дерева, задача о паросочетаниях и многие другие [Алексеев и др., 2005; Емеличев и др., 2015; Тараканов, 1985]. Поэтому любые методы проектирования и анализа фрагментов РВП РегЭС, не учитывающие комбинаторные свойства прилегающих друг к другу соседних КЛБ-вершин будут являться главным образом неполными, а потому и малоэффективными [Тараканов, 1985; Строгонов, 2010].

Далее рассмотрим коротко ряд моментов, касающихся топологических ограничений орграфов  $G_i$  при реконфигурации фрагментов РВП, и сформулируем проблему количественной оптимизации КЛБ-вершин в РВП РегЭС, без которой в общем случае невозможно построение корректной и, как следствие, адекватной графоаналитической модели.

## 2.1. Топологические ограничения графов в РВП РегЭС

Вопрос о *топологических ограничениях орграфов*  $G_i$  в РВП встаёт в процессе адаптивной (по отношению к возникающим в архитектурах РВП неисправностям) реконфигурации РегЭС и имеет непосредственное отношение к процедурам регенерации как отдельных функциональных КЛБ-вершин, так и целых фрагментов РВП РегЭС. В целом этот вопрос довольно обширен и требует детального рассмотрения каждого из примеров. Примерами, о которых в данном случае идёт речь, является анализ каскада итерационных преобразований исходного графа в любые возможные (в пределах ограниченной области РВП) орграфы

$$G_1(X_1, R_1) \rightarrow G_2(X_2, R_2) \rightarrow \dots \rightarrow G_z(X_z, R_z),$$

каждый из которых сопровождается перераспределением связей в пределах матричного набора КЛБ-вершин. Индекс  $z = w + g$  в данной последовательности обозначает включение набора «разрешённых» орграфов  $w$  и набора «запрещённых» орграфов  $g$ . К первому набору относятся все орграфы, удовлетворяющие СФЦ, о которой говорилось в п. 1.3, а ко второму те, которые не удовлетворяют СФЦ. С помощью выявления «разрешённых» графов делается заключение о возможных способах регенерации выделенных фрагментов РВП РегЭС.

Проблему топологических ограничений можно также назвать проблемой *перебора «разрешённых» орграфов*, или проблемой оптимального перераспределения топологии логико-арифметических связей относительно исходного графа  $G_1(X_1, R_1)$  с сохранением его СФЦ. В общем случае этот класс задач решается ранжированием по приоритету графов из набора  $w$  для каждого из возможных способов регенерации рассматриваемого фрагмента РВП. Решение задач в ряде случаев сопровождается поиском набора графов  $G^* = \{G_1^*, G_2^*, \dots, G_l^*\}$ , изоморфных исходному, т. е. таких, что

$$G_1(X_1, R_1) \cong G_1^*(X_1, R_1) \cong G_2^*(X_2, R_2) \cong \dots \cong G_l^*(X_l, R_l).$$

Это в известном смысле упрощает поиск «разрешённых» графов для выделенных фрагментов РВП, поскольку речь в данном случае идёт об архитектурах

однородного типа, а следовательно и об однородных КЛБ-вершинах. Но и в случаях присутствия неоднородных КЛБ-вершин эта вспомогательная процедура всегда предусматривается.

## 2.2. Проблема количественной оптимизации избыточных КЛБ-вершин в РВП РегЭС

В начале работы отмечалось, что в качестве локальных архитектур РВП могут быть использованы и квазистационарные архитектуры, не требующие частой реконфигурации выделенной области РВП РегЭС. Доминирующим классом таких архитектур, используемых, в том числе и в бортовых системах КА, являются архитектуры с низкоуровневым мажоритарным резервированием, стандартные схемы которых представлены на рис. 2.

Переход от архитектуры с одним мажоритарным органом к архитектуре с мажоритарными слоями осуществляется в тех случаях, когда необходимо повысить надёжность самого мажоритарного органа. В пособии [Орлов, Цилькер, 2014] даются примеры расчёта надёжности высокоуровневых аппаратных архитектур, которые также можно взять и за основу расчёта схем надёжности фрагментов РВП РегЭС, реализующих низкоуровневое мажоритарное резервирование.

Ввиду масштабности использования различных способов резервирования КЛБ в РВП и учитывая общее количество задействованных в резервировании КЛБ в рамках различных моделей РегЭС, низкоуровневое резервирование фрагментов РВП РегЭС предлагается относить к категории *низкоуровневого мультирезервирования* аппаратных архитектур РВП, или просто мультирезервирования.

И квазистационарные архитектуры и архитектуры неквазистационарного типа требуют довольно качественного предварительного расчёта вычислительных ресурсов РВП РегЭС, на которые отводится роль «горячего» резервирования КЛБ и отдельных фрагментов РВП. Методики этих расчётов во многом определяются типами ПЛИС, реализующими единое РВП РегЭС.

В рамках данного раздела необходимо также отметить, что сегодня существует довольно большое число структурных решений по построению отказоустойчивых аппаратных архитектур на ПЛИС, основанных на использовании непозиционных систем счисления, и в частности модулярной арифметики (систем остаточных классов), которые при их реализации в РВП сами по себе предусматривают введение избыточных наборов КЛБ. В ряде случаев такие архитектуры выглядят более рациональными и с точки зрения топологических ограничений орграфов  $G_r$ , и с точки зрения выбора оптимального количества избыточных функциональных КЛБ-вершин. Исследование данного вопроса с позиций РегЭС открывает целое независимое направление в разработке отказоустойчивых РегЭС на базе ПЛИС с динамической реконфигурацией, которое в данной работе не затрагивается.

Было упомянуто об оптимальном количестве избыточных функциональных КЛБ-вершин графа  $G_r$ , которое позволяет сформулировать общую *проблему количественной оптимизации избыточных КЛБ-вершин* в РВП РегЭС. Для этого рассмотрим рис. 3, на котором в наглядной и упрощённой форме

представлены два размещаемых во фрагменте РВП орграфа  $G_1 = G_1(X_1, R_1)$  и  $G_2 = G_2(X_2, R_2)$  с выделенными функциональными КЛБ-вершинами  $r_7$  и  $r_2$ .

В окрестности орграфов  $G_1$  и  $G_2$  предусмотрено наличие некоторого набора КЛБ-вершин  $R_{изб}^{РВП}$ , который может быть использован для функционального замещения (реконfigurацией фрагмента РВП, в котором графы  $G_1$  и  $G_2$  рассматриваются) КЛБ-вершин  $r_7$  и  $r_2$ .

Пусть  $G_{A1} = G_1(X_1, R_1) \cup G_2(X_2, R_2)$ , где  $G_{A1}$  — составной орграф архитектуры РВП, описываемой двумя подграфами  $G_1$  и  $G_2$ . Тогда  $R_1 \subset R_{A1}$ ,  $R_2 \subset R_{A1}$  и  $R_{изб}^{РВП} \subset R_{A1}$ , где  $R_{A1}$  — множество КЛБ-вершин фрагмента РВП;  $R_{изб}^{РВП}$  — множество резервных (избыточных) КЛБ-вершин, посредством которых осуществляется резервирование функциональных КЛБ-вершин, относящихся к множествам  $R_1$  и  $R_2$ . При этом понятно, что  $R_{A1} = R_1 \cup R_2 \cup R_{изб}^{РВП}$ .

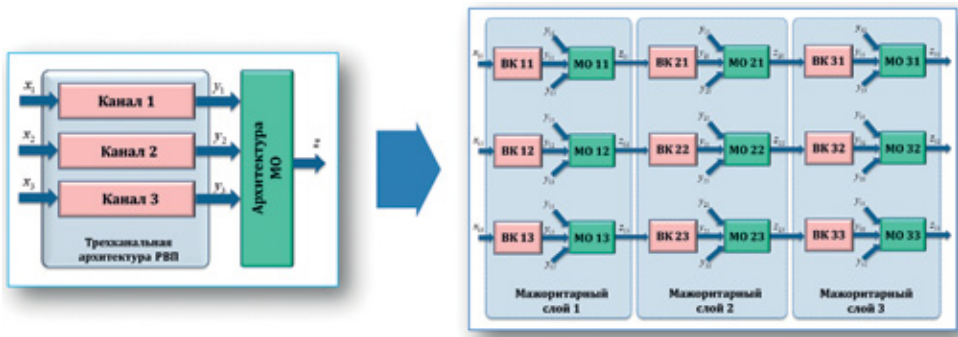


Рис. 2. Стандартные схемы мажоритарного резервирования

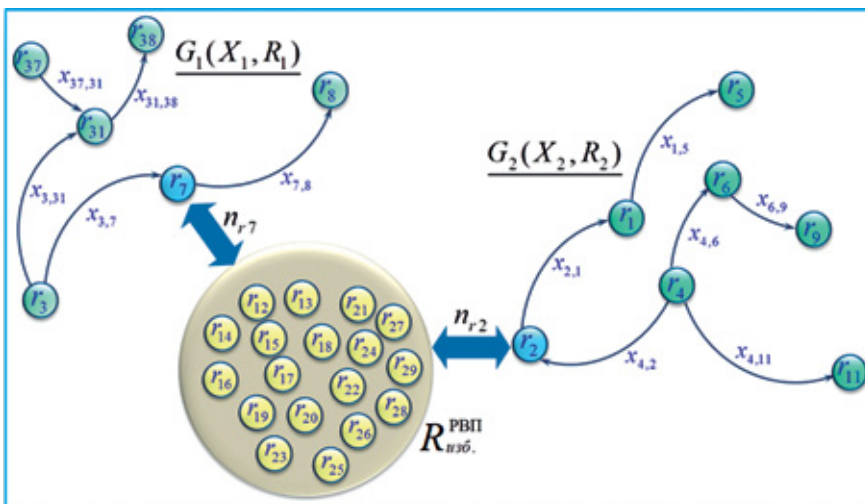


Рис. 3. Проблема количественной оптимизации функциональных КЛБ-вершин в РВП

Вероятность безотказной работы архитектуры РВП  $p_{A_1}$  в общем случае будет определяться топологией орграфов  $G_1$  и  $G_2$ , поскольку вероятности безотказной работы всех КЛБ-вершин РВП РегЭС  $p_{\text{КЛБ}} \approx \text{const}$ , т. е.

$$p_{A_1} = f(p_{G_1}, p_{G_2}) = f(p_{G_1 \cup G_2}).$$

Кроме того, во фрагменте РВП РегЭС всегда существует также некоторый оргграф  $G_3 = G_3(X_3, R_3)$ , на котором реализуется избыточная схема резервирования КЛБ-вершин графов  $G_1$  и  $G_2$ , и который на данном рисунке не представлен. Сделаем грубое допущение, связанное с тем, что граф  $G_3$  появляется только в процессе регенерации архитектуры РВП. Это допущение в определённом смысле будет представлять собой ту самую *потенциальную среду* РегЭС, о которой говорилось в работе [Савкин, 2015а], при этом подразумевается, что  $R_{\text{изб}}^{\text{РВП}} \subseteq R_3$ , т. е.  $G_3 = G_3(X_3, R_{\text{изб}}^{\text{РВП}})$ .

Теперь необходимо заметить, что в рамках идеальной графоаналитической модели РегЭС, в которой каждая КЛБ-вершина  $r_m, m = \overline{1, e}$  может быть зарезервирована  $h$  раз ( $h$ -кратное резервирование), будет выполняться следующее условие.

Для каждого элемента (КЛБ-вершины)  $r_m$ , входящего в состав множества  $R_{A_1}$ , предоставлен набор из  $h$  элементов  $\{r_1^*, r_2^*, \dots, r_h^*\} \subset R_{\text{изб}}^{\text{РВП}}$ . Процедура регенерации будет заключаться в том, что при выходе из строя элемента  $r_m$  будет производиться его функциональное замещение (за счёт локальной или полной реконфигурации фрагмента РВП) на один из элементов набора  $\{r_1^*, r_2^*, \dots, r_h^*\}$ , т. е.

$$r_m \rightarrow r_1^* \rightarrow r_2^* \rightarrow \dots \rightarrow r_h^*.$$

Ну а поскольку доступ к данному набору ограничен прежде всего топологически, то задача количественной оптимизации функциональных КЛБ-вершин на первом этапе проектирования РегЭС заключается в том, чтобы обеспечить доступ функциональных КЛБ-вершин к максимально возможному числу элементов резервного набора  $h$ . Это условие можно представить в виде выражения

$$\left\{ h \mid \forall r_m \in R_{A_1} \exists \{r_j^*\}, j = \overline{1, h} \right\} \rightarrow \max.$$

Поскольку на практике довольно сложно обеспечить резервирование всех функциональных КЛБ-вершин  $r_m$  объединения орграфов  $G_1 \cup G_2$ , то на втором этапе осуществляется назначение избыточных КЛБ-вершин из множества  $R_{\text{изб}}^{\text{РВП}}$  к тем функциональным КЛБ-вершинам, которые будут резервироваться. При этом учитывается влияние количественных соотношений между задействованными (т. е. функциональными) и резервными КЛБ на общую вероятность безотказной работы  $p_{A_1}$ .

Проблема количественной оптимизации КЛБ-вершин в самом общем случае формулируется следующим образом: как обеспечить распределение резервного и функционального ресурсов для каждой из КЛБ-вершин  $r_m$  орграфов  $G_1$  и  $G_2$  так, чтобы не снизить общей надёжности фрагмента РВП при выходе из строя любой из функциональных КЛБ-вершин каждого из этих орграфов?

Определение количественного соотношения между задействованными в вычислительной операции КЛБ-вершинами и КЛБ-вершинами, отводящимися для их восстановления функциональным замещением при реконфигурации фрагмента РВП (т. е., при выполнении процедуры регенерации), играет важную роль в способах повышения надёжности архитектур РВП РегЭС. Решение задачи количественной оптимизации КЛБ-вершин полностью определяется характеристиками архитектур ПЛИС, выбранных для реализации единого РВП РегЭС.

Проблемы топологических ограничений и количественной оптимизации РегЭС могут рассматриваться как независимо, так и в совокупности, в зависимости от конкретных способов локальной либо полной реконфигурации РВП РегЭС. При этом понятно, что данные проблемы полностью взаимосвязаны, поскольку речь идёт о выделенном фрагменте РВП, ограниченном как с точки зрения возможных конфигурационных связей между КЛБ, так и с точки зрения общего количества последних.

Далее введём понятия целевого и избыточного конфигурационных графов РегЭС, и с их позиций коротко поясним процесс выполнения некоторых процедур регенерации КЛБ-вершин в выделенных фрагментах РВП РегЭС.

### 3. ЦЕЛЕВОЙ И ИЗБЫТОЧНЫЙ КОНФИГУРАЦИОННЫЕ ГРАФЫ РегЭС

Вводимые здесь понятия целевого и полного графов являются универсальными по отношению ко всем ранее рассмотренным моделям РегЭС.

Под *целевым графом* РегЭС будем понимать граф  $G^P = G(X^P, R^P)$ , не содержащий избыточных КЛБ-вершин.

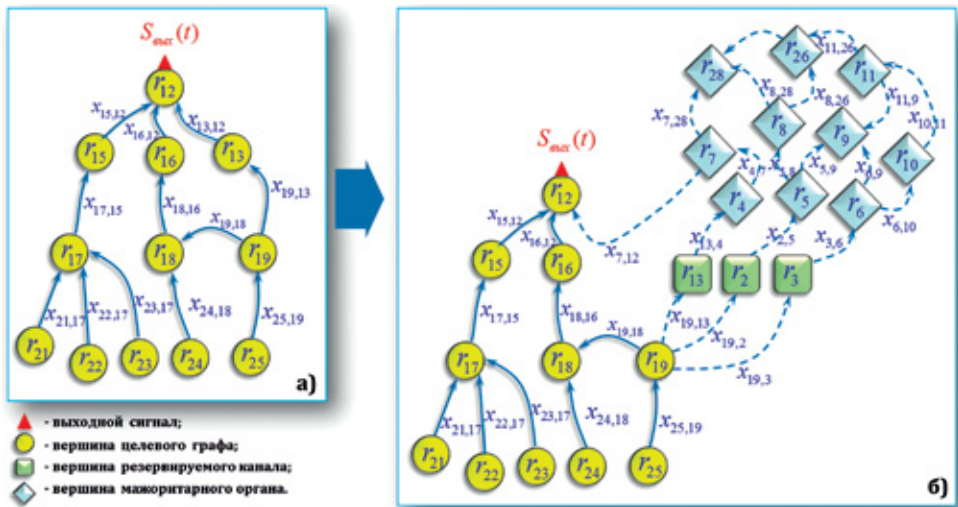


Рис. 4. Простейший пример целевого и избыточного конфигурационных графов РегЭС

Под *избыточным графом*  $\text{RegЭС}$ , напротив, будем понимать граф  $G^F = G(X^P \cup X^R, R^P \cup R^R) = G\left\{\left\{x \mid x \in X^P \vee x \in X^R\right\}, \left\{r \mid r \in R^P \vee r \in R^R\right\}\right\}$ , имеющий в своём составе некоторую совокупность избыточных КЛБ-вершин.

Здесь  $X^P$  и  $X^R$  представляют собой множества КЛБ-вершин, относящихся, соответственно, к функциональной и избыточной группам конфигурационных связей внутри графов  $G^P$  и  $G^F$ , а  $R^P$  и  $R^F$  относятся к соответствующим наборам функциональных и избыточных КЛБ-вершин графов  $G^P$  и  $G^F$ . При этом понятно, что целевой граф всегда будет являться подграфом полного графа, поэтому  $G^P \subseteq G^F$ .

На рис. 4 представлены примеры целевого  $G^P$  (слева) и избыточного  $G^F$  (справа) графов фрагмента РВП, отличающиеся тем, что в составе избыточного графа  $G^F$  имеется подграф  $G^M \subset G^F$ , реализующий трёхканальное мажоритарное резервирование функциональной КЛБ-вершины исходного целевого графа  $r_{19}$ , поэтому  $G^F = G^P \cup G^M$ .

Задачей любой графоаналитической модели  $\text{RegЭС}$  является сохранение целостности структуры целевого графа, который как не трудно догадаться всегда будет соответствовать СФЦ фрагмента РВП. Полный граф же полностью описывает взаимодействие функциональной и потенциальной (или контролирующей) сред  $\text{RegЭС}$  в едином РВП, обеспечивая все необходимые процедуры регенерации КЛБ-вершин целевого графа  $\text{RegЭС}$ .

Теперь с точки зрения определения целевого графа и рассмотренной задачи количественной оптимизации КЛБ-вершин можно дать уточнённое определение  $\text{RegЭС}$ .  $\text{RegЭС}$  это такая РВС, комплекс аппаратно-программных средств которой стремится обеспечить сохранение структурно-функциональной целостности целевого орграфа за счёт количественной оптимизации избыточных функциональных вершин в режиме реального времени и в течение всего срока эксплуатации  $\text{RegЭС}$ . Именно поэтому  $\text{RegЭС}$  можно относить к категории целеустремлённых систем, способных адаптировать свою внутреннюю аппаратную архитектуру как к решаемым задачам, так и к изменяющимся условиям внешних воздействующих факторов. Последний аспект является очень важным ввиду рассмотрения применимости  $\text{RegЭС}$  в качестве бортовых систем цифровой обработки данных в составе современных КА.

Рассмотрим коротко некоторые базовые типы процедур регенерации функциональных КЛБ-вершин с позиций предложенного определения целевого графа  $\text{RegЭС}$  и способов локальной реконфигурации фрагментов РВП.

### 3.1. Процедуры регенерации РВП на основе смещения конфигурационного графа $\text{RegЭС}$

Данный тип регенерации КЛБ-вершин относится к тем случаям, когда реализуются так называемые «плавающие» в РВП аппаратные архитектуры. Регенерация отказавших (к примеру в результате воздействия тяжёлых заряженных частиц) КЛБ, осуществляется за счёт перемещения полного графа  $\text{RegЭС}$  в едином РВП.

В тех случаях, когда вычислительный ресурс единого РВП не позволяет осуществить перемещение полного орграфа  $G^F$  на требуемое число КЛБ

в сетке РВП, полный оргграф может быть «урезан». Смещение полного оргграфа  $G^F$  в РВП может осуществляться как по итерациям, в каждой из которых осуществляется проверка целостности целевого графа  $G^P$ , так и сразу, т. е. в требуемое место РВП относительно начальной позиции графа, в которой была зафиксирована одиночная либо групповая неисправность КЛБ-вершин.

Процедуры регенерации РВП на основе смещения конфигурационного графа РегЭС в зависимости от размерности исходного полного графа  $G^F$  могут осуществляться как за счёт полной реконфигурации РВП, так и за счёт локальной.

### 3.2. Регенерация РВП с помощью локального обхода неисправных КЛБ-вершин

Регенерация РВП с помощью локального обхода неисправных КЛБ-вершин относится к неисправностям выделенных фрагментов РВП на внешних участках, т. е. периферии полного графа  $G^F$ .

Суть данного типа регенерации иллюстрирует рис. 5.

Из данного рисунка видно, что в целом исходный граф  $G_1$  заменяется на другой граф  $G_2$ , который в большинстве случаев содержит большее число КЛБ-вершин по сравнению с исходным.

Все возможности РегЭС по регенерации фрагментов РВП сводятся к решению рассмотренных во втором разделе задач, связанных и с топологическими ограничения графов в РВП РегЭС и с проблемой количественной оптимизации избыточных функциональных КЛБ-вершин.

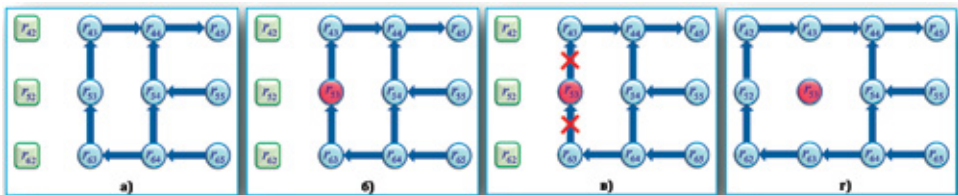


Рис. 5. Восстановление неисправного КЛБ обходом (при реконфигурации РВП)

### 3.3. «Выворачивание» графа на периферию при внутренних неисправностях РВП

Выворачивание графа на периферию РВП относится к тем типам регенерации в РегЭС, которые достигаются, как правило, за счёт полной реконфигурации единого РВП РегЭС. Вместе с тем данный тип регенерации является крайне редким и к нему можно прибегать лишь при тотальных групповых неисправностях в центральной (причём довольно обширной) области РВП.

Во всех случаях «выворачивания» графа на периферию речь идёт только о сохранении целевого графа  $G^P$ . Если данный граф удаётся построить на периферийном участке РВП, то из оставшихся избыточных КЛБ-вершин по-

этапно наращиваются фрагменты, реализующие резервирование вершин целевого графа  $G^P$ .

Как в теории, так и на практике построения отказоустойчивых РегЭС на базе ПЛИС наибольший исследовательский интерес представляют первые два типа регенерации КЛБ в выделенных фрагментах РВП.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Подводя общий итог по данной работе, необходимо отметить, что ещё одним из перспективных способов графоаналитического моделирования РегЭС является способ, основанный на использовании диаграмм Юнга. Основные преимущества и недостатки данного подхода рассматривались ранее [Савкин, 2016] и к настоящему времени не потеряли своей актуальности, ввиду того, что позволяют учитывать как комбинаторные, так и топологические особенности фрагментов РВП при их реконфигурации. Более того в перспективе планируется разработать модифицированный способ графоаналитического моделирования РегЭС, который позволит идентифицировать различного рода логико-арифметические коллизии, возникающие не только по причинам неисправностей КЛБ или внутрисхемных цепей связи, но и по причинам локальной рассинхронизации сигналов после реконфигурации.

Итак, в данной работе был проведён краткий обзор и общий анализ известных на сегодняшний день методов графоаналитического моделирования комбинационных схем, подходящих для их приложения к различным моделям РегЭС. Были показаны подходы по анализу, синтезу, оптимизации и общей оценке архитектур вычислительных систем в рамках большинства типов РегЭС. Рассмотренные подходы в целом были основаны на комбинаторных и топологических ограничениях фрагментов РегЭС, возникающих в процессе локальной и полной реконфигурации единого РВП.

Была сформулирована общая проблема количественной оптимизации КЛБ-вершин, играющая важную роль в методах повышения надёжности функционирования РегЭС.

Показаны основные принципы функционирования РегЭС на основе их комбинированных графоаналитических моделей.

Рассмотренные вопросы можно использовать как при графоаналитическом моделировании РегЭС, так и при разработке контрольно-диагностических алгоритмов, обеспечивающих оптимальное взаимодействие функциональных и контролирующих сред в РВП РегЭС, включая возможности по их взаимозамещению.

## ЛИТЕРАТУРА

- [Акофф, Эмери, 1974] *Акофф Р., Эмери Ф.* О целеустремлённых системах: Пер. с англ. / Под ред. И. А. Ушакова. М.: Сов. радио. 1974. 272 с.
- [Алексеев и др., 2005] *Алексеев В. Е., Таланов В. А.* Графы. Модели вычислений. Структуры данных: Учебник. Нижний Новгород: Изд-во ННГУ, 2005. 307 с.
- [Алексеев и др., 2009] *Алексеев А. А., Корablёв Ю. А., Шестопалов М. Ю.* Идентификация и диагностика систем. М.: Изд. центр «Академия». 2009. 352 с.

- [Богданов и др., 2004] *Богданов А. В., Корхов В. В., Мареев В. В., Станкова Е. Н.* Архитектуры и топологии многопроцессорных вычислительных систем: Курс лекций: Учеб. пособие. М.: ИНТУИТ.РУ «Интернет-Университет Информационных Технологий», 2004. 176 с.
- [Грушанский, Дергачев, 2008] *Грушанский В. А., Дергачев А. А.* Проектирование и эффективность летательных аппаратов. М.: Вузовская кн., 2008. 248 с.
- [Давыдов, Репин, 1996] *Давыдов Ю. Т., Репин А. И.* Основы оптимизации и комплексирования бортовых информационных систем: Учеб. пособие. М.: Изд-во МАИ, 1996. 172 с.
- [Емеличев и др., 2015] *Емеличев В. А., Мельников О. И., Сарванов В. И., Тышкевич Р. И.* Лекции по теории графов: Учеб. пособие. 4-е изд. М.: Ленанд, 2015. 390 с.
- [Каляев и др., 2009] *Каляев И. А., Левин И. И., Семерников Е. А., Шмойлов В. И.* Реконфигурируемые мультиконвейерные вычислительные структуры. 2-е изд., перераб. и доп. / Под общ. ред. И. А. Каляева. Ростов-на-Дону: Изд-во ЮНЦ РАН, 2009. 344 с.
- [Можаев, 1982] *Можаев А. С.* Логико-вероятностный подход к оценке надёжности автоматизированных систем управления. СПб.: ВМА им. Гречко А. А. Депонирована п/я А-1420 № Д047550, 1982. 24 с.
- [Мусаев, Gladkova, 2010] *Мусаев А. А., Gladkova И. А.* Современное состояние и направления развития общего логико-вероятностного метода анализа систем // Тр. СПИИРАН. 2010. Вып. 12. С. 75–96.
- [Орлов, Цилькер, 2014] *Орлов С. А., Цилькер Б. Я.* Организация ЭВМ и систем: Учебник для вузов. 3-е изд. Стандарт третьего поколения. СПб.: Питер, 2014. 688 с.
- [Савкин, 2015a] *Савкин Л. В.* Регенеративные электронные системы в космических системах и комплексах // Вестн. кибернетики. 2015. № 2(18). С. 3–32.
- [Савкин, 2015b] *Савкин Л. В.* К вопросу синтеза функциональных и контролирующих сред в регенеративных локальных электронных системах // Фундаментальные проблемы радиоэлектронного приборостроения: Материалы Международ. научно-технич. конф. «ИНТЕРМАТИК-2015» / Под. ред. акад. РАН А. С. Сигова. Ч. 4. М.: МИРЭА, 2015. С. 105–108.
- [Савкин, 2016] *Савкин Л. В.* Диаграммы Юнга в математическом моделировании бортовых регенеративных электронных систем летательных аппаратов // Гагаринские чтения-2016: 42-я Международ. молодёжная науч. конф.: Сб. тез. докл.: В 4 т. Т. 1. М.: Изд-во МАИ, 2016. С. 590–591.
- [Строгонов, 2010] *Строгонов А. В.* Программируемая коммутация в ПЛИС: взгляд изнутри // Компоненты и технологии. 2010. № 11. С. 56–62.
- [Тараканов, 1985] *Тараканов В. Е.* Комбинаторные задачи и (0, 1)-матрицы. М.: Наука, 1985. 192 с.
- [Уваров, 2007] *Уваров С. С.* Проектирование реконфигурируемых отказоустойчивых систем на ПЛИС с резервированием на уровне ячеек // Автоматика и телемеханика. 2007. № 9. С. 176–189.
- [Хорошевский, 2008] *Хорошевский В. Г.* Архитектура вычислительных систем: учеб. пособие. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2008. 520 с.
- [Шальто, 2000] *Шальто А. А.* Логическое управление. Методы аппаратной и программной реализации алгоритмов. СПб.: Наука, 2000. 780 с.
- [Шкляр, 2009] *Шкляр В. Н.* Надёжность систем управления: учебное пособие / Томский политехнический университет. Томск: Изд-во Томского политех. ун-та, 2009. 126 с.
- [Hauck, 2007] *Hauck S.* Reconfigurable computing: The theory and practice of FPGA-based computation. Morgan Kaufmann Publ., 2007. 944 p.
- [Grout, 2008] *Grout I.* Digital Systems Design with FPGAs and CPLDs. Elsevier Ltd. Publ., Oxford, 2008. 724 p.

## GRAPHIC-ANALYTICAL SIMULATION OF THE SPACECRAFT ONBOARD REGENERATIVE ELECTRONIC SYSTEMS

*L. V. Savkin*

PSC "Radiofizika"

In operation problems of graphic-analytical simulation of earlier offered spacecraft onboard regenerative electronic systems are researched. In the first part of operation the short review of graphic-analytical methods in simulation of the reconfigurable computing architecture suitable to simulation of the regenerative electronic systems is this. In the second part problematic issues of combinatorial restrictions and optimization of graphic-analytical models of regenerative electronic systems are considered, the problem of the quantitative optimization of the functional graphs vertices is formulated. In the third part the main methods of regeneration of a reconfigurable computing field fragments from the line items entered in the real operation concepts of target and excess configuration graphs are considered.

*Keywords:* reconfigurable computing field, graphic-analytical model, fragment, digraph, redundancy, target graph, excess graph.

---

**Savkin** Leonid Vasilyevich — expert, applicant PhD, leo-san-86@mail.ru