

МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

имени М.В. Ломоносова

Факультет вычислительной математики и кибернетики

Кафедра автоматизации систем вычислительных комплексов



На правах рукописи

ВОЛКАНОВ Дмитрий Юрьевич

**МЕТОД ВЫБОРА СБАЛАНСИРОВАННОГО  
НАБОРА МОДУЛЕЙ РАСПРЕДЕЛЁННОЙ  
ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОЙ СИСТЕМЫ И МЕХАНИЗМОВ  
ОБЕСПЕЧЕНИЯ ОТКАЗОУСТОЙЧИВОСТИ**

05.13.11 – математическое и программное обеспечение вычислительных машин,  
комплексов и компьютерных сетей

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук

Москва – 2017

Работа выполнена на кафедре автоматизации систем вычислительных комплексов факультета вычислительной математики и кибернетики Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова».

Научный руководитель: **Бахмуров Анатолий Геннадьевич,**

кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник факультета вычислительной математики и кибернетики Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова»

Официальные оппоненты: **Леохин Юрий Львович,**

доктор технических наук, профессор Департамента компьютерной инженерии Московского института электроники и математики им. А.Н. Тихонова Национального исследовательского университета «Высшая школа экономики»

**Пакулин Николай Витальевич,**

кандидат физико-математических наук, учёный секретарь Федерального государственного бюджетного учреждения науки «Институт системного программирования Российской академии наук»

Ведущая организация:

Акционерное общество «Научно-исследовательский институт вычислительных комплексов им. М.А. Карцева»

Защита состоится 20 июня 2017 г. в 11 часов на заседании диссертационного совета Д 501.001.44 при Московском государственном университете имени М.В. Ломоносова, расположенном по адресу: 119991, ГСП-1, Москва, Ленинские горы, МГУ, 2-ой учебный корпус, факультет вычислительной математики и кибернетики, аудитория 685.

С диссертацией можно ознакомиться в Научной библиотеке Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова по адресу: 119192, г. Москва, Ломоносовский проспект, д. 27 – а также на официальном сайте факультета ВМК МГУ <http://www.cmc.msu.ru> в разделе «Диссертации».

Автореферат разослан «\_\_\_» апреля 2017 г.

Ученый секретарь

диссертационного совета Д 501.001.44

доктор физико-математических наук, доцент



О.В. Шестаков

## Общая характеристика работы

### Актуальность работы.

Одной из краеугольных характеристик распределённой вычислительной системы (РВС) (термин РВС определён в работе<sup>1</sup>) является её надёжность. Под *надёжностью* РВС будем понимать способность РВС сохранять свою работоспособность при определённых спецификацией условиях в течение заданного периода времени. Для количественной оценки надёжности вводят *меру надёжности*, как вероятность безотказной работы в течение интервала  $[0, t_{end}]$  при условии, что система находится в работоспособном состоянии в момент времени  $t=0$ .

Надёжность РВС можно повысить двумя основными способами:

- 1) Использование более надёжных отдельных модулей, из которых состоит система;
- 2) Использование одного или нескольких механизмов обеспечения отказоустойчивости (МОО) на уровне модулей РВС.

Оба этих подхода приводят к увеличению стоимости и/или уменьшению производительности РВС. Поэтому при проектировании РВС необходимо увеличивать надёжность сбалансированно, то есть необходимо выбрать набор МОО и версии аппаратных и программных компонентов модулей РВС так, чтобы обеспечить максимальную надёжность РВС в целом при ограничениях на стоимость. Данная задача в работе называется задачей выбора сбалансированного набора модулей и МОО для РВС или, более кратко, задача выбора сбалансированного набора МОО для РВС. Эта задача относится к задачам, которые в литературе называются задачами оптимизации надёжности вычислительной системы<sup>2</sup>.

Надо сразу отметить, что задача, в которой максимизируется надёжность вычислительной системы при ограничении на стоимость системы рассматривалась разными исследователями начиная с 60-х годов прошлого века и было показано, что она является NP-трудной<sup>3</sup>. В большинстве опубликованных работ в качестве МОО рассматривалось

---

<sup>1</sup> Смелянский Р. Л. Модель функционирования распределённой вычислительной системы с временем // Программирование. — 2013. — № 5. — С. 22–34

<sup>2</sup> Kuo W., Wan R. Recent advances in optimal reliability allocation // Computational intelligence in reliability engineering. — Springer Berlin Heidelberg, 2007. — p. 1-36

<sup>3</sup> Chern M. S. On the computational complexity of reliability redundancy allocation in a series system // Operations research letters. — 1992. — Т. 11. — N. 5. — p. 309-315

исключительно аппаратное резервирование и оценивалась надёжность отдельно для аппаратных или только для программных компонентов модуля РВС. В некоторых работах авторы допускают возможность использования набора МОО, но он не включал в себя все имеющиеся МОО. Для РВС рассмотрение аппаратной и программной составляющих РВС по отдельности не позволяет адекватно оценивать надёжность системы. Поэтому для оценки надёжности всей системы необходимо рассматривать надёжность аппаратуры и программ в комплексе.

Настоящая диссертация посвящена исследованию алгоритмов выбора сбалансированного набора модулей РВС и МОО для модулей РВС в следующей постановке. Пусть нам задана РВС в виде набора модулей и структуры связей между модулями РВС (то есть топология РВС). Каждый модуль может быть построен с помощью хотя бы одного аппаратного и программного компонентов. К каждому модулю может применяться один из заданных МОО. Каждый компонент может иметь несколько версий. Количество аппаратных и программных компонентов в модуле зависит от МОО, используемого для модуля. Тем самым возникает несколько вариантов построения РВС. Требуется выбрать сбалансированный набор вариантов модулей РВС, эффективный по определенным критериям на множестве возможных вариантов построения РВС.

**Актуальность** определяется широкой распространенностью РВС<sup>4</sup>, использованием этого типа систем во всех критически важных технически сложных объектах<sup>5</sup>, а также отсутствием в свободном доступе работ, которые в полной мере позволяют решать задачу оптимизации надёжности для РВС, использующих различные МОО для каждого модуля.

**Цель работы.** Целью диссертационной работы является разработка алгоритмов и исследование их свойств для решения задачи сбалансированного выбора модулей РВС и МОО, с учётом индивидуального набора МОО для каждого модуля РВС.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

- Построить формальную модель организации РВС при наличии МОО. Данная модель должна позволять учитывать наборы МОО, используемые в модулях РВС и предоставлять способ расчёта надёжности и стоимости модуля РВС при наличии МОО, исходя из особенностей каждого модуля.

---

<sup>4</sup> Радченко Г.И., Распределенные вычислительные системы. – Челябинск. – Фотохудожник, 2012. – 184 с.

<sup>5</sup> Колесов Н.В., Толмачева М.В., Юхта П.В. Системы реального времени. Планирование, анализ, диагностирование. - Санкт-Петербург: ОАО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», 2014. – 180с.

- Провести аналитический обзор постановок задачи оптимизации надёжности вычислительных систем и методов их решения для схожих задач и провести анализ возможности их применения для сформулированной задачи.
- Разработать алгоритмы решения задачи выбора сбалансированного набора модулей и МОО для РВС, индивидуально для каждого модуля.
- На основе разработанных алгоритмов реализовать прототип инструментальной системы и провести экспериментальное исследование предложенных алгоритмов.

**Методы исследования.** При получении основных результатов диссертации использовались методы теории надёжности, математической статистики и методы оптимизации.

**Научная новизна.** В диссертации сформулирована новая математическая постановка задачи выбора сбалансированного набора модулей и МОО для РВС. Новизна постановки заключается в возможности выбора своего МОО для каждого модуля РВС. Разработаны и исследованы алгоритмы решения этой задачи, в классе адаптивных эволюционных алгоритмов. Разработанные алгоритмы применимы для нескольких РВС с различными исходными данными без перенастройки параметров алгоритмов.

**Теоретическая и практическая ценность.** Теоретическая ценность работы состоит в постановке новой оптимизационной задачи, разработке математической модели организации РВС при наличии МОО и новых алгоритмов в классе адаптивных эволюционных алгоритмов, исследованию их свойств на тестовых и реальных данных.

Практическая значимость обусловлена тем, что разработанные алгоритмы и программные средства обеспечивают поддержку процесса разработки новых РВС и модернизации существующих.

**Апробация работы.** Результаты, представленные в работе, докладывались на научных семинарах лаборатории Вычислительных комплексов кафедры Автоматизации систем вычислительных комплексов факультета ВМК МГУ под руководством чл.-корр. РАН, профессора Р.Л. Смелянского, семинаре кафедры Автоматизации систем вычислительных комплексов имени чл.-корр. РАН, профессора Л.Н. Королёва, научно-практическом семинаре "Технологии разработки и анализа программ" под руководством профессора А.К. Петренко, а также на 19 конференциях, в том числе:

- Третья европейская конференция по аэрокосмическим наукам (3rd European Conference for Aerospace Sciences, EUCASS'2009) (Франция, Версаль, июль 2009 г.);

- III Всероссийская научная конференция «Методы и средства обработки информации» (МСО-2009) (Россия, Москва, 6-8 октября 2009 г.)
- Шестая международная конференция по надёжности компьютерных систем (Sixth International Conference on Dependability of Computer Systems, DepCos-RELCOMEX 2011) (Польша, Брюнов, 27 июня - 1 июля 2011 г.)
- Четвёртая европейская конференция по аэрокосмическим наукам (4th EUCASS European Conference for Aero-Space Sciences, EUCASS'2011) (Россия, Санкт-Петербург, 4-8 июля 2011 г.)
- Международная научно-практическая конференция «Имитационное и комплексное моделирование морской техники и морских транспортных систем» – «ИКМ МТМТС 2015». (Россия, Санкт-Петербург, 1 июля 2015 г.);
- VIII Московская Международная конференция по исследованию операций (ORM-2016) (Россия, Москва, октябрь 2016 г.);

Диссертационная работа была выполнена в рамках проведения прикладных научных исследований, выполняемых по Соглашению с Министерством науки и образования о предоставлении субсидии №14.579.21.0010 от "05" июня 2014 года по теме "Технология и программное обеспечение распределенных и высокопроизводительных вычислительных систем. Хранение и обработка больших данных".

**Личный вклад** автора заключается в выполнении основного объема теоретических и экспериментальных исследований, изложенных в диссертационной работе, включая разработку алгоритмов и проведение экспериментальных исследований, формулировку и доказательство приведенных утверждений, анализ и оформление результатов в виде публикаций и научных докладов. В опубликованных совместных работах постановка и исследование задач осуществлялись совместными усилиями соавторов при непосредственном участии соискателя.

**Публикации.** По теме диссертации опубликовано 12 печатных работ, 3 из них опубликованы в журналах «Моделирование и анализ информационных систем», «Программирование», «Прикладная информатика», входящих в перечень ведущих научных журналов ВАК РФ, 2 работы индексируются системой Scopus. Список работ приводится в конце автореферата.

**Структура и объем диссертации.** Диссертация состоит из введения, шести глав, заключения и списка литературы. Объем работы — 161 страница. Список литературы содержит 145 наименований. Диссертация снабжена 18 рисунками и 14 таблицами.

## Основное содержание работы

**Во Введении** обоснована актуальность диссертационной работы, сформулирована цель и аргументирована научная новизна исследований, показана практическая значимость полученных результатов, представлены выносимые на защиту научные положения и дано краткое описание задачи.

**В первой главе** приводится содержательная постановка задачи выбора сбалансированного набора модулей и МОО для РВС. Описываются особенности РВС, вводятся основные понятия и обозначения. Затем приводятся оценки надёжности и стоимости РВС в целом. Из всех введённых определений стоит выделить понятие *конфигурации модуля*. Под этим понятием будем понимать набор выбранных аппаратных и программных компонентов и, возможно, МОО. *Конфигурация РВС* – совокупность конфигураций ее модулей.

В данной работе, условием сохранения работоспособности РВС является функционирование всех модулей РВС в течении всего интервала работы системы. Таким образом структура системы с точки зрения надёжности является последовательной и для оценки надёжности РВС применяется метод параллельно-последовательного расчёта <sup>6</sup>.

В данном исследовании РВС представляется с помощью следующих обозначений:

- 1)  $W$  — число модулей РВС;
- 2)  $p_i, q_i$  — количество версий аппаратного и программного компонента  $i$ -го модуля;
- 3)  $C_{ij}^{hw}, R_{ij}^{hw} \forall i \in [1, W], j \in [1, p_i]$  — стоимость и надёжность версий аппаратных компонентов;
- 4)  $C_{ij}^{sw}, R_{ij}^{sw} \forall i \in [1, W], j \in [1, q_i]$  — стоимость и надёжность версий программных компонентов;
- 5)  $FT_i$  — множество МОО, доступных для  $i$ -го модуля;

---

<sup>6</sup> Половко А. М., Гуров С. В. Основы теории надёжности.— БХВ-Петербург СПб., 2006.— С. 704.

- 6)  $C_{ikl_{ext}}^{hw}$ ,  $R_{ikl_{ext}}^{hw}$  — стоимость и надёжность дополнительного  $l$ -го аппаратного компонента  $k$ -го элемента множества доступных элементов множества МОО ( $FT_i$ ) для модуля  $U_i$ ;
- 7)  $C_{ikl_{ext}}^{sw}$ ,  $R_{ikl_{ext}}^{sw}$  — стоимость и надёжность дополнительного  $l$ -го программного компонента  $k$ -го элемента множества доступных элементов множества МОО ( $FT_i$ ) для модуля  $U_i$ ;
- 8)  $C_{System}^{max}$  — максимальная допустимая стоимость системы.

Тогда задача выбора сбалансированного набора модулей и МОО для РВС можно сформулировать следующим образом:

*Необходимо найти:* конфигурацию  $System_{best} \in Systems$ , такую что:

$$\begin{cases} R_{System_{best}} = \max_{Systems} R_{System}, \\ C_{System_{best}} \leq C_{System}^{max}, \end{cases} \quad (1)$$

**Утверждение 1.1.** Сформулированная в работе задача выбора сбалансированного набора модулей и МОО для РВС является NP-полной.

Обсуждаются особенности задачи, которые необходимо учитывать при построении алгоритма решения поставленной задачи, а именно:

- Аргументы и значения функции вычисления надёжности РВС являются дискретными.
- Функция надёжности РВС является нелинейной и определяется конфигурацией РВС.
- Функция стоимости РВС является линейной.
- Каждый модуль РВС имеет свой доступный набор МОО.
- Топология РВС не рассматривается как ресурс обеспечения отказоустойчивости. В работе рассматривается режим функционирования РВС, в котором работают все модули.

**Во второй главе** рассматриваются методы повышения надёжности на разных этапах жизненного цикла системы. В диссертации основным методом повышения надёжности РВС является использование МОО, которые позволяют исправлять проявления ошибок



на этапе функционирования системы. В главе подробно рассматриваются различные виды МОО, используемые в вычислительных системах. Внесение МОО в систему или в отдельно взятый модуль всегда приводит к появлению избыточности в РВС. Несомненно, избыточность необходима для повышения надёжности функционирования системы и обеспечения ее отказоустойчивости. Однако внесение избыточности связано с некоторыми накладными расходами, в первую очередь с увеличением стоимости системы (стоимость дополнительных компонентов, затраты на разработку различных версий программ). Поэтому необходимо найти компромисс между обеспечением отказоустойчивости системы и стоимостью, связанной с ней. Для того, чтобы сформировать набор доступных МОО РВС, их отбор проводился по следующим критериям:

- 1) Механизм не должен вносить изменения в модульную структуру РВС и алгоритмы работы модулей, поскольку процесс проектирования вычислительной системы осуществляется по следующей схеме: сначала разрабатывается структура вычислительной системы, обеспечивающая функциональность, а затем производится её наращивание за счёт использования МОО.
- 2) Применение МОО к некоторому модулю вычислительной системы не должно существенно увеличивать общую стоимость РВС.
- 3) Механизм должен использовать программные и аппаратные компоненты из набора потенциально используемых в модулях РВС без существенных модификаций.
- 4) Все аппаратные компоненты системы должны быть активными, то есть находиться в работающем состоянии, поскольку ввод новых компонентов во время работы РВС может быть крайне затруднительным.

Для отбора подходящих МОО был сделан сравнительный анализ существующих МОО. В рамках обзора была приведена общая классификация МОО вычислительных систем. В обзоре рассмотрены все широко применяемые на данный момент аппаратные, программные и программно-аппаратные методы, приведены общая схема и принцип их работы, свойства, преимущества, недостатки и оценена возможность их использования в РВС.

По результатам аналитического обзора существующих МОО для исследования были выбраны следующие МОО:

- метод N-версионного программирования;
- метод активного резервирования в сочетании с методом N-версионного программирования;
- метод активного резервирования;
- метод активного резервирования в сочетании с методом восстановления блоками.

Для каждого из МОО были приведены формулы расчёта стоимости и надёжности модуля при использовании в нём соответствующего МОО.

**В третьей главе** проведён аналитический обзор методов решения задачи выбора сбалансированного набора МОО для РВС. Показано, что задача является частным случаем задачи оптимизации надёжности. Поэтому в диссертации была дана классификация постановок задач оптимизации надёжности<sup>7</sup>. Был выделен ряд критериев, относящихся к классификации постановок задач оптимизации надёжности (ROP) и выделены те категории критериев, которые относятся к поставленной в первой главе задаче.

Алгоритмы решения задач оптимизации надёжности можно разделить на 3 категории<sup>8</sup>:

- 1) точные методы;
- 2) эвристические;
- 3) метаэвристические.

Точные методы наиболее подходят для задач небольшой размерности. Эвристические алгоритмы - это алгоритмы, основанные на правдоподобных, но не всегда обоснованных математически предположениях о свойствах оптимального решения задачи оптимизации надёжности. Метаэвристический алгоритм - это алгоритмическая схема, а не конкретный алгоритм. Процесс её адаптации для решения задачи оптимизации надёжности означает выбор и фиксацию основных алгоритмических параметров, превращающий схему в стохастический или детерминированный алгоритм.

---

<sup>7</sup> Kuo W., Wan R. Recent advances in optimal reliability allocation //Computational intelligence in reliability engineering. – Springer Berlin Heidelberg, 2007. – p. 1-36

<sup>8</sup> Soltani R. Reliability optimization of binary state non-repairable systems: A state of the art survey //International Journal of Industrial Engineering Computations. – 2014. – Т. 5. – N. 3. – p. 339-364.

В рассмотренных работах в качестве методов решения, схожих с поставленной в первой главе задачей, исследуются метаэвристические алгоритмы. В различных статьях были использованы такие метаэвристики, как генетические алгоритмы, алгоритмы имитации отжига, алгоритмы муравьиных и пчелиных колоний, кукушечьи алгоритмы, алгоритмы роя частиц, иммунные алгоритмы, нейросетевые алгоритмы и другие.

Из рассматриваемых алгоритмов только для генетических алгоритмов (ГА) и алгоритма имитации отжига существует математический аппарат, позволяющий объяснить почему алгоритмы способны работать. Для ГА Д. Гольдбергом<sup>9</sup> была высказана гипотеза строительных блоков. Поскольку алгоритм имитации отжига уже был подробно рассмотрен в работе<sup>10</sup> для близкой задачи синтеза архитектур, то в данной работе подробно рассмотрены генетические и эволюционные алгоритмы (ГА, ЭА).

**В четвёртой главе** рассматривается метод решения задачи выбора сбалансированного набора модулей и МОО для РВС. В качестве метода решения были рассмотрены ГА и ЭА. В настоящее время среди исследователей существуют различные точки зрения на то, где проходит граница между генетическими и эволюционными алгоритмами. В данной работе мы будем придерживаться терминологии работы работы Холланда<sup>11</sup>, в которой к генетическим алгоритмам предъявляются жёсткие требования в отношении способа кодирования особей, а именно допустимо лишь бинарное кодирование. В ЭА допускается произвольная схема кодирования. Отдельно были рассмотрены гибридные ГА (ЭА). Эти алгоритмы строятся на основе одной из двух концепций. Первая основана на использовании ГА(ЭА) для сужения области поиска решения и в дальнейшем использовании другого алгоритма. Как правило, генетические алгоритмы имеют достаточно много настраиваемых параметров, поэтому вслед за задачей проектирования генетического алгоритма, возникает задача его настройки и вторая концепция построения гибридных ГА (ЭА) основана на автоматической настройке генетического алгоритма в процессе его работы. Если первая группа гибридных ГА И ЭА активно использовалась для задач оптимизации надёжности, то вторая группа гибридных алгоритмов не была достаточно изучена для задач оптими-

---

<sup>9</sup> Goldberg D. E. Genetic algorithms in search, optimization, and machine learning // Addison Wesley. – 1989. – Т. 1989. – р. 102

<sup>10</sup> Зорин Д.А. Синтез архитектур вычислительных систем реального времени с учетом ограничений на время выполнения выполнения и требований к надёжности: Дис. канд. физ.-мат. наук: 05.13.11 / Московский Государственный Университет имени М.В. Ломоносова.— 2014.— 133 с.

<sup>11</sup> Holland J. H. Adaptation in natural and artificial systems. An introductory analysis with application to biology, control, and artificial intelligence // Ann Arbor, MI: University of Michigan Press. - 1975. - pp. 183

зации надёжности. Поэтому для сформулированной в первой главе задачи было решено разработать исследовать гибридные эволюционные алгоритмы, которые можно было бы отнести ко второй группе.

В главе приведено описание двух предлагаемых методов решения поставленной в первой главе задачи.

Предлагаемый адаптивный эволюционный алгоритм (АЭА) включает в себя следующие основные шаги:

- 1) **Кодирование решения.** Каждое решение задачи выбора сбалансированного набора МОО кодируется в виде строки. Строка состоит из блоков, которые соответствуют модулям РВС. Каждый блок (ген) представляет собой тройку вида  $\langle H, S, F \rangle$ .  $H$  - это номер конфигурации аппаратной составляющей модуля,  $S$  - это номер конфигурации программной составляющей, а  $F$  - это порядковый номер МОО из множества  $FT_{avail}$ , используемого в данном модуле. По каждой строке может быть вычислена целевая функция - надёжность системы  $R_{system}$ , которая характеризует качество решения, и однозначно восстановлена соответствующая конфигурация РВС.  $num$  - число особей в популяции (параметр алгоритма).
- 2) **Подготовка популяции решений.** Генерация случайным образом популяции решений  $System_k, k \in [1, num]$  для первой итерации алгоритма.
- 3) **Начальная оценка популяции.** На этом этапе происходит вычисление целевой функции  $R_{system}$  и проверка ограничений стоимости  $C_{system} \leq C_{system}^{max}$ . Если решение не удовлетворяет ограничениям, то оно штрафуются.
- 4) **Выполнение операции селекции.** В данном алгоритме используется пропорциональная схема селекции. Популяция сортируется, отбираются лучшие  $X\%$  (изменяемый параметр) особей, наилучших по значению целевой функции, которые затем участвуют в операции скрещивания.
- 5) **Выполнение операции скрещивания.** В качестве операции скрещивания используется одноточечное скрещивание модулей РВС. Скрещивание запускается столько раз, сколько особей в первоначальной популяции ( $num$ ). В результате получается промежуточная популяция, которая состоит из  $num$  родителей и  $num$  потомков.

- 6) **Формирование новой популяции.** Промежуточная популяция из  $2^{*n_{it}}$  особей сортируется по возрастанию целевой функции. В новую популяцию берётся доля (изменяемый параметр) лучших особей от исходной популяции, остальная часть популяции формируется из лучших особей промежуточной популяции, полученной после операции скрещивания. Таким образом, количество особей в популяции становится равным первоначальному значению.
- 7) **Выполнение операции мутации.** Некоторый процент лучших особей популяции (изменяемый параметр) не мутирует. Все остальные особи мутируют с некоторой степенью мутации (изменяемый параметр) и с некоторой вероятностью (изменяемый параметр). Оператор мутации является модификацией одноточечной мутации.
- 8) **Оценка популяции.** На этом этапе происходит проверка ограничений стоимости  $C_{system} \leq C_{system}^{max}$  и вычисление целевой функции  $R_{system}$ . Таким образом, решения, не удовлетворяющие ограничениям, будут взяты в следующую популяцию с меньшей вероятностью. Штрафная функция представляет собой коэффициент, на которой умножается значение надёжности. Этот коэффициент должен быть равен 1, если решение удовлетворяет ограничениям, и должен принадлежать  $(0;1)$ , иначе. Кроме того, логично выбирать его так, чтобы большему значению стоимости соответствовало меньшее значение штрафного коэффициента. В соответствии с такими условиями был выбран следующий вид штрафных функций:

$$E_{cost} = \begin{cases} 1, \text{если } C_{system} < C_{system}^{max} \\ \frac{C_{system}^{max}}{C_{system}}, \text{если } C_{system} \geq C_{system}^{max} \end{cases}$$

$$R_{system}^{**} = R_i^* * E_{cost}$$

Также на этом шаге фиксируется лучшее на текущий момент решения, вычисление среднего значения целевой функции.

- 9) **Проверка критерия останова алгоритма.** Если он выполнен, то переход к п.11, если нет, то переход к п.10.
- 10) **Блок автоматического изменения значений параметров алгоритма.** Блок автоматического изменения значений параметров алгоритма осуществляет автома-

тическую подстройку значений параметров алгоритма и переход к п.4. Он нужен для того, чтобы в автоматическом режиме корректировать настройки ЭА, управлять степенью влияния операций селекции, скрещивания и мутации на эволюционный процесс согласно некоторым правилам в зависимости от результатов работы алгоритма, которые получаются в каждом поколении. Правила изменения параметров для АЭА зависят непосредственно от значений этих параметров. Каждый из перечисленных в таблице параметров имеет три значения (большое, среднее и малое). Конкретное числовое значение определяется экспериментатором, исходя из параметров оптимизируемой системы. В зависимости от изменений среднего и лучшего значения надёжности популяции в процессе работы АЭА происходит изменение значений параметров алгоритма. Такая схема изменения параметров имеет малую сложность по сравнению с вычислением целевых функций и проверки ограничений для всех особей популяции, но при этом позволяет производить автоматическую перенастройку ЭА в процессе его работы.

- 11) **Завершение алгоритма.** В качестве результата выбирается наилучшая из найденных конфигураций  $System_{best}$ .

**Утверждение 4.1** Предложенный алгоритм АЭА обладает свойствами корректности и полноты.

Предлагаемый самообучающийся эволюционный алгоритм (СЭА) включает в себя следующие основные шаги:

- 1) **Кодирование решения.** Аналогично АЭА каждое решение задачи выбора сбалансированного набора МОО кодируется в виде строки. Строка состоит из блоков, которые соответствуют модулям РВС. Каждый блок (ген) представляет собой тройку вида  $\langle H, S, F \rangle$ .  $H$  - это номер конфигурации аппаратной составляющей модуля,  $S$  - это номер конфигурации программной составляющей, а  $F$  - это порядковый номер МОО из множества  $FT_{avail}$ , используемого в данном модуле. По каждой строке может быть вычислена целевая функция - надёжность системы  $R_{system}$ , которая характеризует качество решения, и однозначно восстановлена соответствующая конфигурация РВС.  $num$  - число особей в популяции (параметр алгоритма).
- 2) **Подготовка популяции решений.** Генерация случайным образом популяции решений  $System_k, k \in [1, num]$ , для первой итерации алгоритма.

- 3) **Начальная оценка популяции.** На этом этапе происходит вычисление целевой функции  $R_{system}$  и проверка ограничений стоимости  $C_{system} \leq C_{system}^{max}$ . Если решение не удовлетворяет ограничениям, то оно штрафуются.
- 4) **Выполнение операции селекции.** В данном алгоритме используется пропорциональная схема селекции. Популяция сортируется, отбираются лучшие  $X\%$  (изменяемый параметр) особей, наилучших по значению целевой функции, которые затем участвуют в операции скрещивания.
- 5) **Выполнение операции скрещивания.** В качестве операции скрещивания используется одноточечное скрещивание модулей РВС. Затем для выбранных в результате селекции решений  $X_i$  и  $X_j$  случайным образом выбираются число  $r \in [0, 1]$  и точка  $k \in [1, W]$ . Если  $r \leq P_{cross}^i$  и  $r \leq P_{cross}^j$ , то решения обмениваются своими частями относительно точки  $k$ . Если же для одного из решений неравенство не выполняется, то это решение не изменяется в результате скрещивания.
- 6) **Выполнение адаптации параметров скрещивания.** Для параметров скрещивания выполняется операция адаптации. Адаптация производится в соответствии с выбранным относительным законом адаптации.
- 7) **Выполнение операции мутации.** В качестве операции мутации используется схема одноточечной мутации: для каждого решения  $X_i$ , случайным образом выбираются число  $r \in [0, 1]$  и точка  $j \in [1, W]$ . Если  $r \leq P_{mut}^i$ , то конфигурация модуля  $U_j$  заменяется случайным образом.
- 8) **Выполнение адаптации параметров мутации.** Для параметров мутации выполняется операция адаптации. Адаптация производится в соответствии с выбранным относительным законом адаптации.
- 9) **Оценка популяции.** На этом этапе происходит проверка ограничений стоимости  $C_{system} \leq C_{system}^{max}$  и вычисление целевой функции  $R_{system}$ . Если решение не удовлетворяет ограничениям, то оно штрафуются аналогично алгоритму АЭА.

$$E_{cost} = \begin{cases} 1, & \text{если } C_{system} < C_{system}^{max} \\ \frac{C_{system}^{max}}{C_{system}}, & \text{если } C_{system} \geq C_{system}^{max} \end{cases}$$

$$R_{system}^{**} = R_i^* * E_{cost}$$

Также на этом шаге фиксируется лучшее на текущий момент решение.

- 10) **Проверка критерия останова.** В качестве критерия останова используется следующий критерий. Проверяется число итераций алгоритма без изменения лучшего решения. Если число итераций алгоритма превышает заранее определённое число *MaxStagnation*, то переход к п.11, если нет, то переход к п.4.
- 11) **Завершение алгоритма.** В качестве результата выбирается наилучшая из найденных конфигураций *System<sub>RTES</sub>*.

**Утверждение 4.2** Предложенный алгоритм СЭА обладает свойствами корректности и полноты.

**Пятая глава** содержит описание программных средств, созданных в рамках данной работы. Это - программное средство для разработки и запуска алгоритмов оптимизации RelOpt и среда моделирования ДИАНА, с которой был интегрирован RelOpt. В пятой главе приводится общее описание этих средств, описание архитектуры, графического интерфейса и схемы их интеграции.

Средство RelOpt обладает следующей функциональностью и свойствами:

- нахождение сбалансированного набора модулей и МОО РВС;
- возможность сохранения на диске и загрузки с диска наборов исходных данных;
- возможность отдельного (без графического интерфейса) использования RelOpt в составе других средств;
- графический пользовательский интерфейс (ГПИ);
- возможность подключения других алгоритмов оптимизации;
- кросс-платформенность, то есть возможность работать на вычислительных системах под управлением различных операционных систем;
- интеграция со средой моделирования ДИАНА.

**В шестой главе** приведено описание методики и результаты экспериментального исследования разработанных алгоритмов. В главе были сформулированы следующие цели экспериментального исследования:



- 1) Сравнить эффективность работы АЭА с классическим ГА (КГА), описанным в статье <sup>12</sup>, по следующим критериям:
  - точность как отклонение значения целевой функции от оптимального значения;
  - сложность, вычислительные затраты на выполнение алгоритма (характеризуется количеством итераций);
  - стабильность работы алгоритма (стабильность значения целевой функции на полученном решении и вычислительных затрат на нахождение решения).
- 2) Исследовать зависимость работы АЭА от числа элементов области решений, удовлетворяющих разным ограничениям на стоимость системы.
- 3) Сравнить качество решений, полученных при помощи разработанного варианта СЭА для различных значений параметров, и выбрать лучшую из комбинаций;
- 4) Сравнить качество и время получения решений разработанного варианта СЭА с КГА и АЭА.

Для достижения намеченных целей была разработана соответствующая методика проведения экспериментов. Эксперименты проводились на тестовых данных, а также на данных системы цифровой обработки сигналов и навигационной системы.

На основании проведённого экспериментального исследования были сделаны следующие выводы:

- точность алгоритма АЭА оказалась выше алгоритма КГА, а отклонение АЭА от оптимального решения получилось не превосходящим 5%;
- на малой области приемлемых решений (удовлетворяющих ограничению на стоимость конфигурации системы), предпочтительным оказывается АЭА, так он имеет меньшую сложность;
- на большой области приемлемых решений (80% от общего числа), точность, стабильность и сложность алгоритма АЭА лучше, чем у алгоритма КГА.
- СЭА с относительным методом адаптации показал лучшие в среднем результаты на всех рассматриваемых системах;

---

<sup>12</sup> Wattanapongskorn N., Coit D. W. Fault-tolerant embedded system design and optimization considering reliability estimation uncertainty //Reliability Engineering & System Safety. - 2007. - v. 92. - n. 4. - p. 395-407

- логистический и относительный с забыванием методы адаптации в СЭА показали близкие результаты надёжности в среднем по экспериментам, обогнав ГА, АЭА и СЭА с абсолютным методом адаптации;
- модификации ГА находят более качественные решения, чем классический ГА вне зависимости от класса системных ограничений;
- ГА и АЭА находят решение за меньшее число итераций, чем варианты СЭА, но менее качественное чем СЭА.

Таким образом, можно сделать вывод, что предложенные в работе методы АЭА и СЭА работают лучше КГА. Особенно это проявляется на малой области приемлемых решений.

**В Заключение** сформулированы основные результаты диссертации.

## **Основные результаты, выносимые на защиту:**

- 1) Построена математическая модель организации РВС, в рамках которой сформулирована задача выбора сбалансированного набора МОО для современных РВС на основе выбора МОО индивидуально для каждого модуля РВС.
- 2) В классе эволюционных алгоритмов получено решение сформулированной задачи. Предложенные алгоритмы способны автоматически адаптироваться к параметрам базового набора компонентов и структуре РВС без предварительного обучения.
- 3) Проведено исследование свойств алгоритмов методом статистических испытаний. Исследование показало, что точность, стабильность и скорость сходимости предложенных алгоритмов лучше, чем у известных для решения схожих задач.
- 4) Разработанные алгоритмы интегрированы в программный комплекс для решения задачи выбора сбалансированного набора МОО на этапе проектирования РВС. Комплекс используется в учебном процессе.

## **Публикации по теме диссертации**

1. Волканов Д. Ю. Метод сбалансированного выбора механизмов обеспечения отказоустойчивости для распределённых вычислительных систем // Моделирование и анализ информационных систем. — 2016. — Т. 23, № 2. — С. 119–136.

2. Smelyansky R.L., Bakhmurov A.G., Volkanov D.Yu, Chemeritskii E.V. Integrated environment for the analysis and design of distributed real-time embedded computing systems // *Programming and Computer Software*. — 2013. — Vol. 39, no. 5. — P. 242–254.
3. Бахмуров А.Г., Волканов Д.Ю., Смелянский Р.Л., Чемерицкий Е.В. Интегрированная среда для анализа и разработки встроенных вычислительных систем реального времени // *Программирование*. — 2013. — № 5. — С. 35–52.
4. Волканов Д. Ю., Зорин Д. А. Исследование применимости моделей оценки надёжности для разработки программного обеспечения с открытым исходным кодом // *Прикладная информатика*. — 2011. — № 2. — С. 26–32.
5. Balashov V.V., Bakhmurov A.G., Chistolinov M.V., Smeliansky R.L., Volkanov D.Yu, Youshchenko N.V. A hardware-in-the-loop simulation environment for real-time systems development and architecture evaluation // *International Journal of Critical Computer-Based Systems*. — 2010. — Vol. 1, no. 1/2/3. — P. 5–23
6. Волканов Д. Ю. Адаптивный метод сбалансированного выбора модулей встроенной вычислительной системы с учётом требований надёжности // VIII Московская международная конференция по исследованию операций (ORM2016): Москва, 17–22 октября 2016 г. Труды / том 2. — Т. 2. — ФИЦ ИУ РАН Москва, 2016. — С. 20–22.
7. Запутляев И. А., Волканов Д. Ю. Исследование адаптивного генетического алгоритма для решения задачи оптимизации надёжности распределенных вычислительных систем // *Программные системы и инструменты. Тематический сборник №16 — МАКС Пресс Москва, 2016*. — С. 119–130.
8. Bakhmurov A., Balashov V., Glonina A., Pashkov V., Smeliansky R., Volkanov D. Simulation modeling based method for choosing an effective set of fault tolerance mechanisms for real-time avionics systems // *EUCASS advances in aerospace sciences book series*. — Vol. 6. — EDP Sciences, France, 2013. — P. 487–500.
9. Bakhmurov A.G., Balashov V.V., Pashkov V.N., Smeliansky R.L., Volkanov D.Yu. Method for choosing an effective set of fault tolerance mechanisms for real-time embedded systems, based on simulation modeling // *Problems of dependability and modeling*. — Wroclaw, Poland, 2011. — P. 13–26.
10. Волканов Д. Ю., Глонина А. Б. Исследование модификаций адаптивного гибридного эволюционного алгоритма для задачи сбалансированного выбора модулей РВС РВ и их механизмов обеспечения отказоустойчивости // *Программные системы и инструменты*.

Тематический сборник — Т. 12 - — Издательский отдел факультета ВМК МГУ имени М.В. Ломоносова; МАКС Пресс Москва, 2011. — С. 150–162.

11. Волканов Д. Ю. Методика выбора оптимального набора механизмов отказоустойчивости для вычислительных систем реального времени // Научная сессия МИФИ-2007. Сборник научных трудов. Том 12. (Информатика, компьютерные системы и технологии). — МИФИ Москва, 2007. — С. 110–111.

12. Волканов Д. Ю., Григорян М. В. Методика выбора оптимального набора механизмов отказоустойчивости для бортовых вычислительных систем // Программные системы и инструменты. Тематический сборник. — Т. 7 — МАКС Пресс Москва, 2006. — С. 147–155.