

На правах рукописи

**ЕГОРШИН Артем Юрьевич**

**ОТКАЗОУСТОЙЧИВЫЕ  
ПРОГРАММНО-АППАРАТНЫЕ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫЕ КОМПЛЕКСЫ  
СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ БУРЕНИЕМ  
С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ ПОДДЕРЖКИ  
ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ**

**Специальность 05.13.01**

**«Системный анализ, управление и обработка информации»**

**АВТОРЕФЕРАТ**

**диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук**

**Уфа 2007**

Работа выполнена на кафедре вычислительной техники и защиты информации  
Уфимского государственного авиационного технического университета

Научный руководитель	д-р техн. наук, проф. <b>ФРИД Аркадий Исаакович</b>
Официальные оппоненты	д-р техн. наук, проф. <b>КРЫМСКИЙ Виктор Григорьевич</b>
	канд. техн. наук, доц. <b>ГИНИЯТУЛЛИН Вахит Мансурович</b>
Ведущая организация	<b>Научно-исследовательский институт технических систем «Пилот», г. Уфа</b>

Защита состоится 25 декабря 2007 г. в 10<sup>00</sup> часов  
на заседании диссертационного совета Д-212.288.03  
при Уфимском государственном авиационном техническом университете  
по адресу: 450000, Республика Башкортостан, г. Уфа, ул. К.Маркса, 12

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке университета

Автореферат разослан 22 ноября 2007 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета  
д-р техн. наук, проф.

**В.В. Мионов**

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### Актуальность темы

В настоящее время эффективность освоения нефтегазовых месторождений в значительной степени зависит от совершенства техники и технологии бурения скважин с большими отклонениями стволов от вертикали и с горизонтальными участками сравнительно большой протяженности, что связано с использованием контроля забойных параметров непосредственно в процессе бурения. Разработкой систем контроля и управления траекторией ствола скважин занимаются фирмы Schlumberger, Sperry-Sun, Baker Hughes, General Electric, ОАО НПП «ВНИИГИС», ОАО НПФ «Геофизика», НИИ ТС «Пилот» и др. Современная тенденция построения систем бурения такова, что непрерывно возрастает количество информации, которую необходимо получать непосредственно в скважине. С другой стороны, существуют жесткие условия эксплуатации и ограничения, связанные, в частности, с проблемой передачи информации из скважины на поверхность с достаточно высокой скоростью. Одним из перспективных направлений является создание буровых роботов – специализированных спускаемых программно-аппаратных вычислительных комплексов (ПАВК) систем управления бурением (СУБ) для обработки и анализа полученной с датчиков информации, принятия управляющих решений и их осуществления непосредственно в скважинной зоне.

ПАВК СУБ работают в тяжелых условиях эксплуатации, относятся к классу неоднородных специализированных систем реального времени, осуществляющих мониторинг и управление объектом в условиях временных ограничений, к которым предъявляются повышенные требования надежности, так как отказы могут привести к чрезвычайным последствиям и/или значительным материальным затратам. Отказ или недостоверность информации в ПАВК СУБ приводит к нарушению процесса бурения и/или выходу из строя бурового оборудования. Замена оборудования забойной части в случае отказа является трудоемкой и дорогостоящей операцией.

В связи с увеличением объемов бурения растет потребность в телеметрических системах, используемых в процессе бурения. В то же время, средняя наработка на отказ современных телеметрических систем компаний Schlumberger и Sperry-Sun составляет лишь 1000-3000 часов. Поэтому в последние годы отмечается устойчивая тенденция повышения надежности телеметрических систем за счет внедрения новых решений. Как правило, для обеспечения требуемого уровня надежности используются компоненты, имеющие высокие характеристики надёжности, и различные методы на этапе проектирования. Однако возможности такого подхода ограничены, и необходимо использовать структурные методы, связанные с введением различных видов избыточности, методы обеспечения отказоустойчивости. Повышение отказоустойчивости может быть достигнуто за счет использования средств обеспечения функциональной надежности (гарантоспособности).

ПАВК СУБ создаются в рамках жестких габаритных ограничений, имеют ограниченные программно-аппаратные ресурсы и функциональные возможности. В то же время, возможности современной элементной базы и методов *N*-версионного проектирования позволяют в пределах одного кристалла получать значительную аппаратную, алгоритмическую, временную и информационную избыточность. Отка-

зоустойчивый ПАВК СУБ представляет собой систему со сложной неоднородной структурой, имеющую множество разнородных вариантов реконфигурации, которые сводятся не только к дублированию однородных элементов. Применение известных методов обеспечения отказоустойчивости не позволяет в полной мере обеспечить учет динамики изменения характеристик системы, её элементов и влияния отказавших элементов системы на характеристики других элементов, прогнозирование отказов, оценку эффективности использования резервов во времени и т.п. Это, в свою очередь, вызвано применением средств, не учитывающих предысторию поведения системы и, как следствие, не обладающих достаточной гибкостью и адаптивностью к изменяющимся условиям работы и собственному состоянию в условиях неопределенности. Кроме того, применение многих методов затруднено ввиду их ресурсоёмкости, сложности реализации, недетерминированности системы.

Поэтому для повышения отказоустойчивости ПАВК СУБ необходимо провести исследование возможности применения методов и средств обеспечения отказоустойчивости и системы принятия решения о реконфигурации для неоднородной вычислительной среды на основе обработки информации о результатах тестирования и оценки эффективности применения резервов с использованием средств искусственного интеллекта, придающих системе свойства интеллектуального поведения.

Значительный вклад в теорию надежности технических систем внесли зарубежные и российские ученые А. Авиженис, Г. Майерс, Б.В. Гнеденко, Ю.К. Беляев, А.Д. Соловьев, А.М. Половко, К.А. Ёгуду, И.А. Ушаков и др., в теорию систем искусственного интеллекта, интеллектуальных систем принятия решений и управления большой вклад внесли Л. Заде, Б. Коско, Э. Мамдани, В.И. Васильев, А.И. Галушкин, Б.Г. Ильясов, В.В. Круглов и др.

**Объектом исследования** являются отказоустойчивые программно-аппаратные вычислительные комплексы систем управления бурением.

**Предмет исследования** – методы и средства обеспечения отказоустойчивости, алгоритмы обработки информации, направленные на повышение эффективности процесса принятия решения о реконфигурации программно-аппаратных вычислительных комплексов систем управления бурением.

**Цель работы** состоит в повышении отказоустойчивости программно-аппаратных вычислительных комплексов систем управления бурением с использованием интеллектуальной поддержки принятия решений.

**Задачи исследования.** Для достижения поставленной цели в диссертационной работе на основе проведенного анализа существующих методов обеспечения отказоустойчивости применительно к программно-аппаратным вычислительным комплексам систем управления бурением решаются следующие задачи:

1. Разработка структуры системы обеспечения отказоустойчивости программно-аппаратного вычислительного комплекса системы управления бурением на базе нечеткой когнитивной карты.

2. Разработка метода обеспечения отказоустойчивости программно-аппаратного вычислительного комплекса на базе нечёткой когнитивной карты.

3. Разработка методики проектирования отказоустойчивого программно-аппаратного вычислительного комплекса системы управления бурением на базе нечёткой когнитивной карты.

4. Разработка математического и алгоритмического обеспечения процесса функционирования отказоустойчивого программно-аппаратного вычислительного комплекса системы управления бурением на базе нечеткой когнитивной карты.

5. Экспериментальное подтверждение теоретических результатов.

#### **Методы исследования**

При решении поставленных в диссертационной работе задач использовались методы линейной алгебры, систем искусственного интеллекта, системного анализа, теории надежности, имитационного моделирования и программирования.

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

1. Структура системы обеспечения отказоустойчивости программно-аппаратного вычислительного комплекса системы управления бурением, осуществляющей реконфигурацию его модулей на основе нечеткой когнитивной карты.

2. Метод обеспечения отказоустойчивости программно-аппаратного вычислительного комплекса на основе блока восстановления и алгоритмов реконфигурации на базе нечеткой когнитивной карты.

3. Методика проектирования отказоустойчивого программно-аппаратного вычислительного комплекса системы управления бурением с использованием нечеткой когнитивной карты, системы обеспечения отказоустойчивости и предложенного метода обеспечения отказоустойчивости.

4. Алгоритм реконфигурации блока обеспечения отказоустойчивости с использованием нечеткой когнитивной карты и матрицы запретов, алгоритм функционирования системы обеспечения отказоустойчивости программно-аппаратного вычислительного комплекса системы управления бурением.

5. Результаты исследования эффективности предложенного метода обеспечения отказоустойчивости на базе разработанной методики и алгоритмического обеспечения отказоустойчивого программно-аппаратного вычислительного комплекса системы управления бурением, проведенного с помощью имитационного моделирования и разработанного программного обеспечения.

#### **Научная новизна**

1. Предложена структура системы обеспечения отказоустойчивости программно-аппаратного вычислительного комплекса системы управления бурением: принятие решения о реконфигурации осуществляется с использованием нечеткой когнитивной карты и обработки информации о результатах тестирования элементов, что позволяет обеспечивать отказоустойчивость с необходимым качеством обслуживания или живучесть комплекса.

2. Предложен метод обеспечения отказоустойчивости, основанный на применении  $N$ -версионного проектирования и блока восстановления, отличающийся тем, что управление избыточностью во времени осуществляется с помощью оценки эффективности использования резервов на основе значений концептов нечеткой когнитивной карты и контролируемых параметров, что позволяет увеличить коэффициент готовности системы.

3. Предложена методика проектирования отказоустойчивого программно-аппаратного вычислительного комплекса системы управления бурением, отличающаяся тем, что расчетные характеристики элементов и структура этого комплекса используются для создания нечеткой когнитивной карты, что позволяет реализовать

систему обеспечения отказоустойчивости программно-аппаратного вычислительного комплекса системы управления бурением с использованием предложенного метода обеспечения отказоустойчивости.

4. Разработано алгоритмическое обеспечение: алгоритм реконфигурации блока обеспечения отказоустойчивости с использованием нечеткой когнитивной карты и матрицы запретов, алгоритм функционирования системы обеспечения отказоустойчивости программно-аппаратного вычислительного комплекса системы управления бурением, позволяющее повысить отказоустойчивость этого комплекса.

#### **Практическая ценность и реализация результатов работы**

1. Предложенная структура системы обеспечения отказоустойчивости программно-аппаратного вычислительного комплекса системы управления бурением на базе нечеткой когнитивной карты позволяет обеспечивать отказоустойчивость с необходимым качеством обслуживания или живучесть комплекса и может стать основой для создания специализированных программно-аппаратных вычислительных комплексов реального времени повышенной надежности.

2. Предложенный метод обеспечения отказоустойчивости на основе нечеткой когнитивной карты по сравнению с известным методом на базе блока восстановления позволяет увеличить коэффициент готовности программно-аппаратного вычислительного комплекса системы управления бурением, увеличить в 1,9 раза время до фатального отказа системы, обеспечить необходимое качество обслуживания даже при ужесточении критерия качества обслуживания в 3 раза.

3. Предложенная методика проектирования, математическое и алгоритмическое обеспечение отказоустойчивого программно-аппаратного вычислительного комплекса системы управления бурением позволяет реализовать систему обеспечения отказоустойчивости в программно-аппаратных вычислительных комплексах реального времени, имеющих сложную неоднородную структуру с множеством разнородных вариантов реконфигурации.

4. Разработанное алгоритмическое обеспечение составляет основу для реализации предложенной методики проектирования и системы обеспечения отказоустойчивости программно-аппаратных вычислительных комплексов систем управления бурением.

Разработанная методика проектирования отказоустойчивого программно-аппаратного вычислительного комплекса системы управления бурением с применением предложенного метода обеспечения отказоустойчивости на основе блока восстановления и алгоритмов реконфигурации на базе нечеткой когнитивной карты принята к использованию в НИИ ТС «Пилот» для повышения отказоустойчивости системы управления процессом направленного бурения. Результаты диссертационной работы использованы в учебном процессе Уфимского государственного авиационного технического университета.

**Апробация работы.** Основные положения диссертационной работы докладывались и обсуждались на следующих научных конференциях и семинарах: Всероссийской молодежной научно-технической конференции «Интеллектуальные системы управления и обработки информации» (г. Уфа, 2003); Международных молодежных конференциях «XXIX и XXX Гагаринские чтения» (г. Москва, 2003-2004); XX Международной научно-технической конференции студентов и аспирантов «Ра-

диоэлектроника, электротехника и энергетика» (г. Москва, 2004); 6-й и 7-й Международных конференциях «Компьютерные науки и информационные технологии» (г. Будапешт, Венгрия, 2004; г. Уфа-Ассы, 2005); 1-м и 2-м Региональных зимних семинарах аспирантов и молодых ученых «Интеллектуальные системы обработки информации и управления» (г. Уфа, 2006-2007).

**Публикации.** Основные положения и результаты исследований по теме диссертации опубликованы в 12 работах, включая 1 статью в рецензируемом журнале из списка ВАК, 9 публикаций в центральных журналах, трудах и материалах конференций российского и международного значения, 2 свидетельства об официальной регистрации программ для ЭВМ по теме диссертации.

**Структура и объем работы.** Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы и двух приложений. Основное содержание работы изложено на 125 страницах машинописного текста, включая иллюстрации, таблицы. Список литературы включает 122 наименования и занимает 12 страниц. Приложения изложены на 38 страницах.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** обоснована актуальность диссертационной работы, сформулированы цель и задачи исследования, отмечаются научная новизна и практическая ценность результатов, выносимых на защиту.

**В первой главе** рассмотрены структура и функции ПАВК СУБ, отмечена потенциальная возможность реализации разнородных вариантов реконфигурации с различными видами избыточности с учетом ограничений и необходимость использования методов обеспечения отказоустойчивости. В ПАВК СУБ программно реализован основной цикл, в котором выполняется сбор и обработка информации с датчиков, формирование и передача управляющих сигналов на исполнительные устройства. Время отклика соответствует времени выполнения одного прохода основного цикла (итерации) и не должно превышать предельного срока, определенного требуемой периодичностью формирования управляющих сигналов 1-3 Гц, задающей требуемое качество обслуживания. После выполнения итерации остается резервное время до начала следующей итерации, позволяющее использовать методы и средства обеспечения отказоустойчивости. Отказоустойчивый ПАВК СУБ реализуется на основе специализированных вычислительных устройств (СВУ) – микроконтроллеров и представляет собой систему со сложной неоднородной структурой, позволяющей реализовать множество разнородных (с различными видами избыточности) вариантов реконфигурации в пределах каждого кристалла на базе методов *N*-версионного проектирования. За критерий оценки качества работы системы обеспечения отказоустойчивости ПАВК СУБ принят коэффициент готовности с учетом ограничений на время отклика, время и погрешность решения каждой задачи основного цикла и допустимые габариты ПАВК СУБ.

В результате анализа существующих методов обеспечения отказоустойчивости в рамках концепции гарантоспособности с учетом характерных типов отказов и ограничений ПАВК СУБ, определено, что возможность применения одновариантных методов (на базе дублирования), многовариантных методов (на базе *N*-версионного проектирования) на основе голосования и гибридных методов затруд-

нена не только из-за их ресурсоёмкости и сложности реализации. На уровне задач основного цикла возможно применение многовариантного метода на основе блока восстановления, но при наличии множества разнородных версий данный метод неэффективен. В основном это обусловлено применением средств, не учитывающих предысторию поведения системы и не обладающих достаточной гибкостью и адаптивностью к изменяющимся условиям работы и собственному состоянию в условиях неопределенности.

Предложен подход на базе интеллектуальной поддержки принятия решений о реконфигурации, основанный на оценке эффективности использования вариантов реконфигурации во времени. Для выполнения каждой задачи основного цикла используется блок обеспечения отказоустойчивости, в котором реализуется многовариантный метод и различные версии. При решении  $i$ -й задачи  $i$ -м блоком на очередной итерации  $z$  возможно определение и сохранение для дальнейшего использования следующей информации: времени и мгновенной величины погрешности решения задачи с помощью блока, данных об отказах версий и соответствующих элементов. С помощью обработки сохраненной информации, полученной на интервале итераций  $[z - \Delta z; z]$  при  $\Delta z = const$ , определяются параметры функционирования блока: среднее время решения задачи  $t_{CP}^i(z, \Delta z)$ , средняя погрешность решения задачи  $\delta_{CP}^i(z, \Delta z)$  и частота отказов в блоке  $F_{OTK}^i(z, \Delta z)$ .

В  $i$ -м блоке содержится  $V(i)$  версий. Каждая  $j$ -я версия  $i$ -го блока характеризуется расчетными параметрами, определяемыми на этапе проектирования: временем решения задачи  $t_{PACЧ}^{j,i}$ , оценкой погрешности решения задачи  $\delta_{PACЧ}^{j,i}$  и вероятностью отказа  $P_{PACЧ}^{j,i}$ , позволяющими приближенно оценить эффективность использования версий на начальном этапе эксплуатации. На основе обработки сохраненной информации об отказах элементов, используемых в различных версиях  $i$ -го блока, для каждой  $j$ -й версии этого блока на итерации  $z$  определяется частота отказов в версии  $F_B^{i,j}(z, \Delta z)$ . Оценка эффективности использования  $j$ -й версии  $i$ -го блока на итерации  $z$  в общем случае осуществляется с помощью функции

$$C_B^{i,j}(z) = f_B(t_{PACЧ}^{j,i}, \delta_{PACЧ}^{j,i}, P_{PACЧ}^{j,i}, F_B^{i,j}(z, \Delta z), t_{CP}^i(z, \Delta z), \delta_{CP}^i(z, \Delta z), F_{OTK}^i(z, \Delta z)). \quad (1)$$

На  $(z+1)$  итерации в блоке обеспечения отказоустойчивости принятие решения о реконфигурации осуществляется с учетом ранжирования версий на основе оценки эффективности их использования. Таким образом, задача повышения отказоустойчивости ПАВК СУБ формулируется как задача нахождения максимального значения

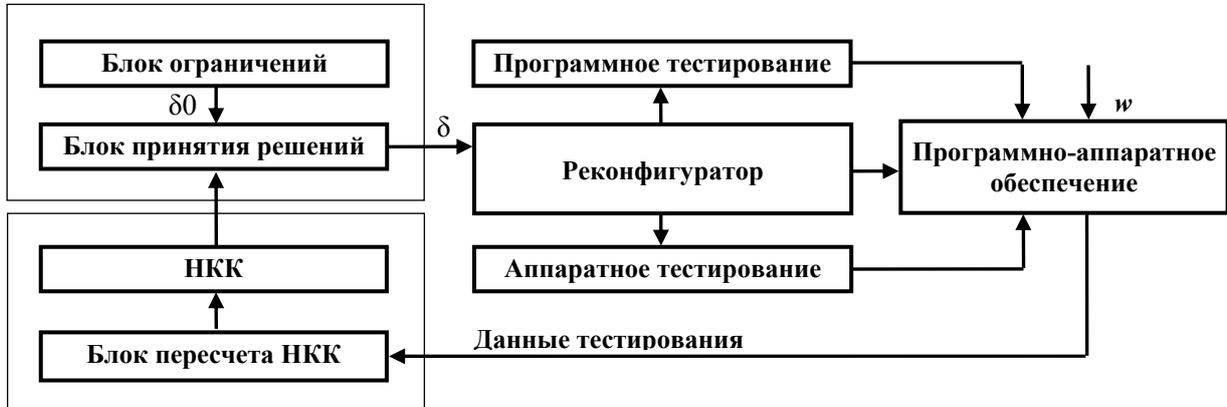
$$C_B^i(z) = \max \{C_B^{i,1}(z), C_B^{i,2}(z), \dots, C_B^{i,V(i)}(z)\} \quad (2)$$

для каждого блока  $i$  на каждой итерации  $z$  с учетом описанных выше ограничений.

Проведен анализ возможности применения систем искусственного интеллекта для решения этой задачи. Показана принципиальная возможность применения нечетких когнитивных карт (НКК) для поддержки принятия решений в задаче повышения отказоустойчивости ПАВК СУБ. В работе используются расширенные НКК на основе стандартной модели Коско. Отмечено, что в настоящее время отсутствуют методики проектирования, структуры и методы, обеспечивающие отказоустойчи-

вость ПАВК СУБ с применением НКК, математическое и алгоритмическое обеспечение этих методик. Сформулированы цель и задачи исследования.

**Вторая глава** посвящена разработке структуры, методики проектирования отказоустойчивого ПАВК СУБ и метода обеспечения отказоустойчивости на базе НКК. Разработана структура системы обеспечения отказоустойчивости ПАВК СУБ, являющаяся основой для реализации предложенного подхода (рис. 1).



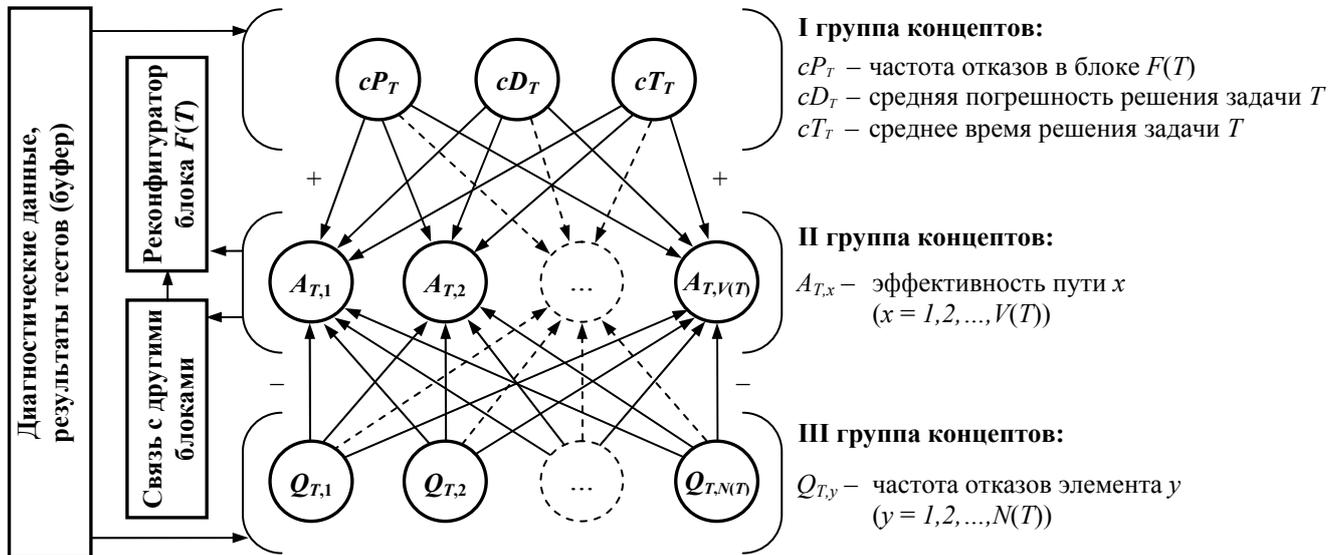
**Рисунок 1.** Структура системы обеспечения отказоустойчивости ПАВК СУБ

На программно-аппаратное обеспечение оказывают влияние различные факторы  $w$ : внешние аппаратные сбои, изменение режимов функционирования, физические сбои и ошибки проектирования. Его реконфигурация проводится на уровне задач основного цикла путем минимизации вектора отклонения  $\delta = (\delta_1, \delta_2, \delta_3)$  между требуемыми и реальными значениями параметров его элементов ( $\delta_1$  – частота отказов,  $\delta_2$  – среднее время и  $\delta_3$  – средняя погрешность решения задачи), которые определяются с помощью НКК и обработки данных тестирования. Если отклонение  $|\delta|$  не превышает ограничения  $|\delta_0|$ , то обеспечивается отказоустойчивость с необходимым качеством обслуживания (в противном случае – живучесть). Разработана методика проектирования отказоустойчивого ПАВК СУБ, позволяющая реализовать систему обеспечения отказоустойчивости и состоящая из следующих этапов:

- 1) описание классов отказов, ожидаемых во время жизненного цикла;
- 2) определение задач отказоустойчивого ПАВК СУБ  $T_0-T_m$ , где  $m$  – количество задач основного цикла (задачи  $T_1-T_m$ ), задача  $T_0$  обеспечивает выполнение функций системы обеспечения отказоустойчивости;
- 3) выделение подсистем и соответствующих элементов ПАВК СУБ;
- 4) определение значимости каждой задачи для системы, введение резервирования с использованием  $N$ -версионного проектирования и неоднородных вариантов реконфигурации; вычисление расчетных параметров версий и элементов, используемых при проектировании НКК блоков обеспечения отказоустойчивости;
- 5) оценка влияния отказов элементов на решение задач, выделение зоны ответственности, в пределах которой рассматриваются возможность локализации отказов и варианты реконфигурации ПАВК СУБ;
- 6) создание блоков обеспечения отказоустойчивости  $F(1)-F(m)$  для задач  $T_1-T_m$ : в блок  $F(i)$  включаются  $N(i)$  элементов ПАВК СУБ, используемых при решении задачи  $T_i$ , определяются все варианты её решения (пути)  $V(i)$ , где  $i=1,2,\dots,m$ ;
- 7) создание структуры и определение матрицы связей НКК для каждого блока;

реализация алгоритмов, используемых в различных блоках.

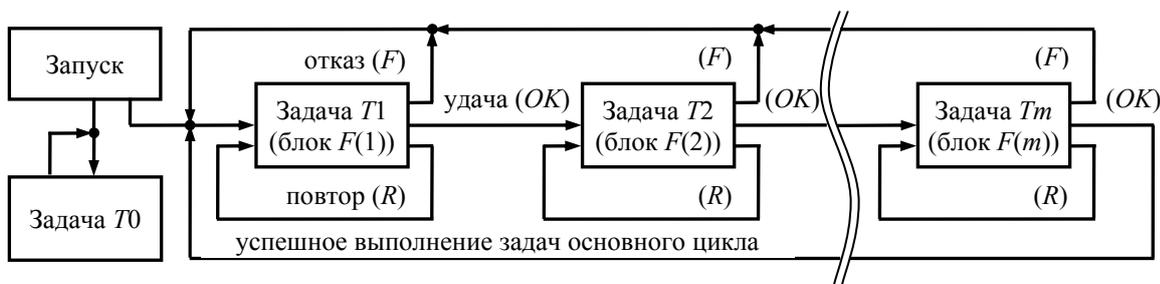
Рассмотрена структура и определены принципы функционирования блока обеспечения отказоустойчивости  $F(T)$ . Для оценки эффективности использования путей согласно (1) в блоке используется НКК (рис. 2).



**Рисунок 2.** Структура НКК блока обеспечения отказоустойчивости  $F(T)$

Концепты I группы характеризуют параметры функционирования блока независимо от выбранного пути. Для каждого пути создается концепт II группы, характеризующий эффективность использования этого пути в блоке на очередной итерации, значение которого рассчитывается на основе значений концептов I и III групп. Связям между концептами соответствуют функции причинно-следственного отношения, определяемые на этапе проектирования. Каждый концепт I группы связан с каждым концептом II группы. В концепт  $A$  направлены дуги концептов  $Q$  элементов, используемых при решении задачи с помощью пути, соответствующего концепту  $A$ . Данные тестирования элементов и параметры функционирования блока хранятся в кольцевых буферах и используются для расчета значений концептов и пересчета НКК после каждой попытки решения задачи.

На основе значений концептов НКК проводится анализ эффективности использования  $V(T)$  путей согласно (1) и выбирается один из них. В случае успешного решения задачи выполнение блока завершается с сигналом «удача» и выполняется следующий блок в основном цикле (рис. 3).

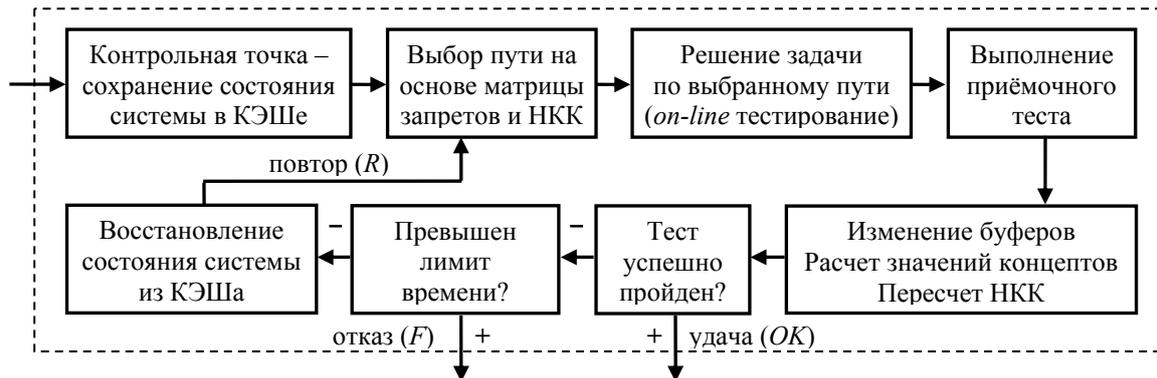


**Рисунок 3.** Блок-схема функционирования отказоустойчивого ПАВК СУБ

При возникновении и локализации отказа в одном из элементов выбранного пути проводится реконфигурация, и задача решается повторно. В случае отказа,

приводящего к невозможности решения задачи  $T$  в блоке или превышению допустимого времени решения, выполнение блока прекращается с сигналом «отказ» и основной цикл выполняется с первой задачи. Показана необходимость использования матрицы запрещенных путей при выборе пути в блоках.

Для реализации предложенного подхода и блока  $F(T)$  разработан метод обеспечения отказоустойчивости, основанный на применении  $N$ -версионного проектирования, блока восстановления, алгоритмов реконфигурации на базе НКК (рис. 4), являющийся развитием известного многовариантного метода на основе блока восстановления. Эффективность применения различных путей определяется при каждом выборе пути согласно (2) на основе НКК и матрицы запрещенных путей.



**Рисунок 4.** Блок-схема метода обеспечения отказоустойчивости на базе НКК

**Третья глава** посвящена разработке математического и алгоритмического обеспечения процесса функционирования отказоустойчивого ПАВК СУБ на основе НКК. Предложена методика определения элементов матрицы связей НКК для дуг типа «III-II» и «I-II» между концептами соответствующих групп на основе расчетных параметров элементов и путей. НКК блока обеспечения отказоустойчивости  $F(T)$  содержит  $N_C$  концептов и описывается следующими элементами:

- 1) вектором концептов  $C = (C_i)$ , где  $i = 1, 2, \dots, N_C$ ;  $N_C = 3 + V(T) + N(T)$ ;
- 2) вектором значений концептов  $C(t)$  в дискретный момент времени  $t$ ;
- 3) матрицей связей  $W = (W_{j,i})$ , где  $i, j = 1, 2, \dots, N_C$ ;  $W_{j,i}$  или  $W_{j,i}(C_j(t))$  – функция причинно-следственного отношения дуги, направленной от концепта  $C_j$  к  $C_i$ ;
- 4) вектором принадлежности концептов  $G = (G_i)$  одной из трех групп.

Обозначение « $C_i$ » соответствует концепту с порядковым номером  $i$  из набора

$$CN = (cP, cD, cT, A_1, A_2, \dots, A_{V(T)}, Q_1, Q_2, \dots, Q_{N(T)}). \quad (3)$$

При пересчете НКК на итерации  $(t+1)$  сначала определяются значения концептов I и III групп, затем с использованием сигмоидной функции  $f$  осуществляется пересчет значений концептов II группы:

$$C_i(t+1) = f \left( \sum_{j=1, i \neq j}^{N_C} W_{j,i}(C_j(t)) + C_i(t) \right) \quad (i = \overline{1, N_C} \setminus G_i \neq 2). \quad (4)$$

При увеличении частоты отказов элемента ПАВК СУБ уменьшается прогнозируемая эффективность путей, в которых он используется. В случае невозможности восстановления элемента (при этом значение концепта  $Q$  равно единице), выполнение соответствующего пути приводит к отказу, поэтому для дуг типа «III-II» из

концепта  $Q_i$  в  $A_j$  (путь состоит из  $m(j)$  элементов) определена функция

$$W_{j+V(T)+3,i+3}(C_{j+V(T)+3}(t)) = \begin{cases} -C_{j+V(T)+3}(t)/m(j), & 0 \leq C_{j+V(T)+3}(t) < 1, \\ -1, & C_{j+V(T)+3}(t) = 1. \end{cases} \quad (5)$$

На примере дуг, направленных из концепта  $cP$ , рассмотрим методику определения элементов матрицы связей для дуг типа «I-II». Нулевое значение концепта I группы соответствует «лучшему» значению параметра (1 – «худшему»). Чем больше частота отказов в блоке, тем больше значение концепта  $cP$ , при этом большее влияние оказывается на концепты, прогнозирующие эффективность тех путей, расчетная вероятность отказа которых меньше. Допустим, значения концептов  $cD$ ,  $cT$  не изменяются, а частота отказов в блоке возрастает. Тогда значения концептов II группы увеличиваются в соответствии со значениями расчетной вероятности отказа путей, а при оценке эффективности путей большую значимость приобретает критерий «частота отказов в блоке». На этапе проектирования блока производится ранжирование путей по значению расчетной вероятности отказа согласно условию (6). Элементы матрицы связей для дуг, направленных из концепта  $cP$ , определяются по формуле (7) или (8) в случае равенства значений расчетных параметров всех путей. Аналогично определяются остальные элементы матрицы связей для дуг типа «I-II».

$$P_{PACЧ}^{r(1)} \leq P_{PACЧ}^{r(2)} \leq \dots \leq P_{PACЧ}^{r(V(T))}; \quad 1 \leq r(i) \leq V(T); \quad r(i) \neq r(j) \forall i = \overline{1, V(T)}, j = \overline{1, V(T)} \setminus i; \quad (6)$$

$$W_{i+V(T)+3,1}(C_1(t)) = \frac{C_1(t)}{3} \left( 1 - \frac{P_{PACЧ}^i - P_{PACЧ}^{r(1)}}{P_{PACЧ}^{r(V(T))} - P_{PACЧ}^{r(1)}} \right) \quad (i = \overline{1, V(T)}), \quad (7)$$

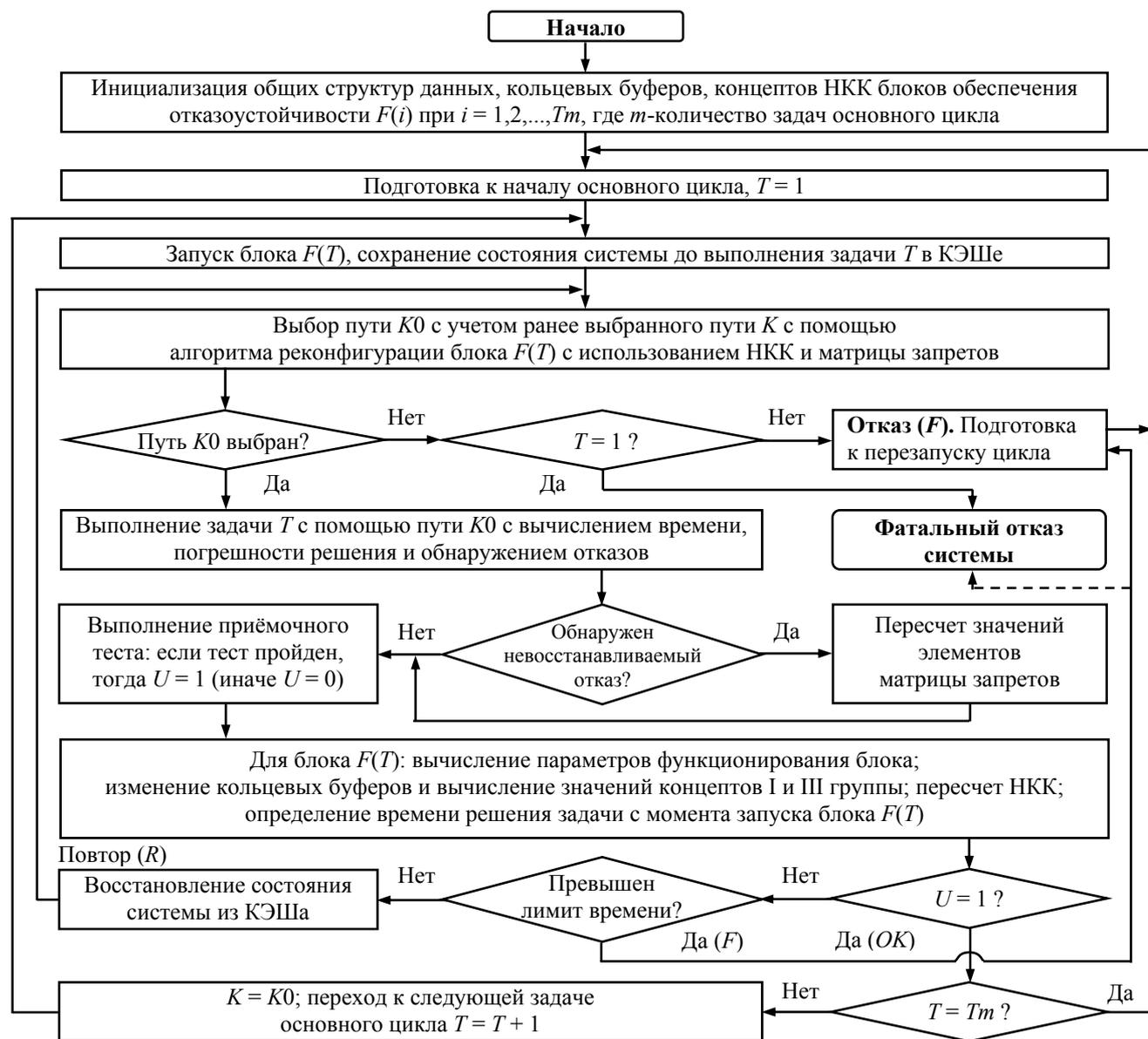
$$W_{i+V(T)+3,1}(C_1(t)) = C_1(t)/6 \quad (i = \overline{1, V(T)}, P_{PACЧ}^1 = \dots = P_{PACЧ}^{V(T)}). \quad (8)$$

Предложена методика определения параметров функционирования блока  $F(T)$  и вычисления значений концептов I и III группы НКК на основе обработки данных тестирования, сохраненных на последних итерациях: среднего времени и средней погрешности решения задачи в блоке, частоты отказов в блоке и частоты отказов каждого элемента блока. Разработаны структуры данных на основе кольцевых буферов, позволяющие компактно хранить данные в памяти вычислителя, а также оптимизированные алгоритмы обработки информации и вычисления параметров функционирования без использования циклов.

Разработан алгоритм реконфигурации блока обеспечения отказоустойчивости с использованием НКК и матрицы запретов, содержащей номера путей, не выбираемых при реконфигурации. После обнаружения невозстанавливаемого отказа в одном из элементов ПАВК СУБ в матрицу включаются номера соответствующих путей. Если реконфигурация осуществляется в блоке  $F(1)$ , то находится концепт с максимальным значением среди множества концептов II группы НКК за исключением концептов, соответствующих путям, содержащимся в матрице запретов. Выбирается путь, соответствующий этому концепту, номер пути сохраняется в переменной  $K0$ . Если все пути блока  $F(1)$  запрещенные, то наступает фатальный отказ системы. В блоках  $F(i)$  при реконфигурации учитывается номер пути  $K0$ , выбранного в блоке  $F(i-1)$ , где  $i > 1$ . Рассматривается множество концептов II группы НКК с учетом матрицы запретов за исключением концептов, соответствующих путям бло-

ка  $F(i)$ , в которые невозможно перейти из пути  $K0$  блока  $F(i-1)$ , и выбирается путь, соответствующий концепту с максимальным значением. Если все пути блока запрещенные, то выполнение блока прекращается с сигналом «отказ» и основной цикл выполняется с первой задачи; иначе номер выбранного пути сохраняется в переменной  $K0$ . Путь с номером  $K0$  используется для решения задачи блока.

Для реализации предложенного подхода на базе интеллектуальной поддержки принятия решений о реконфигурации на основе системы обеспечения отказоустойчивости ПАВК СУБ с использованием НКК разработан алгоритм функционирования системы обеспечения отказоустойчивости ПАВК СУБ (рис. 5).



**Рисунок 5.** Алгоритм функционирования системы обеспечения отказоустойчивости ПАВК СУБ

В случае превышения лимита времени, определенного для решения задачи блока  $F(T)$ , наступает отказ, вызванный этим событием. При этом ПАВК СУБ может оставаться работоспособным, но с допустимым снижением качества обслуживания (обеспечивается живучесть). В ряде случаев превышение времени может привести к фатальному отказу системы (рис. 5).

В четвертой главе проводятся экспериментальные исследования для оценки эффективности использования разработанной методики проектирования отказоустойчивого ПАВК СУБ и системы обеспечения отказоустойчивости ПАВК СУБ с использованием интеллектуальной поддержки принятия решений о реконфигурации на базе НКК. Критериями оценки эффективности являются время наработки на отказ, коэффициент готовности. Проводится сравнительное имитационное моделирование. Объект моделирования – программная последовательность, реализующая алгоритм функционирования системы обеспечения отказоустойчивости ПАВК СУБ с применением одного из методов обеспечения отказоустойчивости: известного метода на базе блока восстановления (*RB*) и предложенного метода (*RB-НКК*) на базе блока восстановления и алгоритмов реконфигурации на основе НКК.

Разработана методика проведения имитационного моделирования процесса функционирования программной последовательности, реализующей алгоритм функционирования системы обеспечения отказоустойчивости. Моделирование проводится с помощью реализации методики на языке программирования высокого уровня, что обусловлено природой объекта моделирования. При подготовке объекта моделирования использованы исходная структурная схема ПАВК СУБ (рис. 6) и исходные параметры элементов, рассмотрены задачи основного цикла, соответствующие элементы и варианты реконфигурации на уровне задач, применена разработанная методика для проектирования отказоустойчивого ПАВК СУБ на базе НКК.

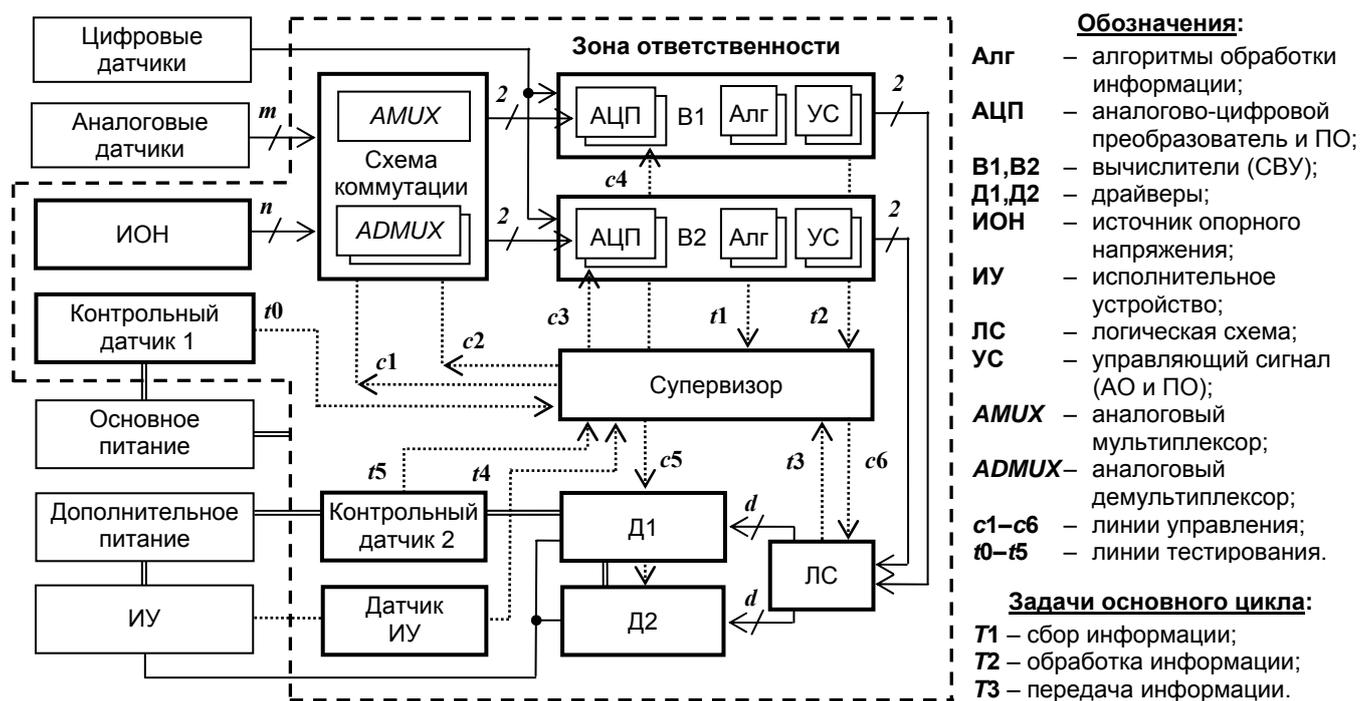


Рисунок 6. Исходная структурная схема ПАВК СУБ

Параметры процесса функционирования элементов ПАВК СУБ генерируются на основе исходных данных, так как пошаговая имитация алгоритмов функционирования программных и аппаратных элементов очень трудоемка.

Моделирование проведено с учетом следующих ограничений:

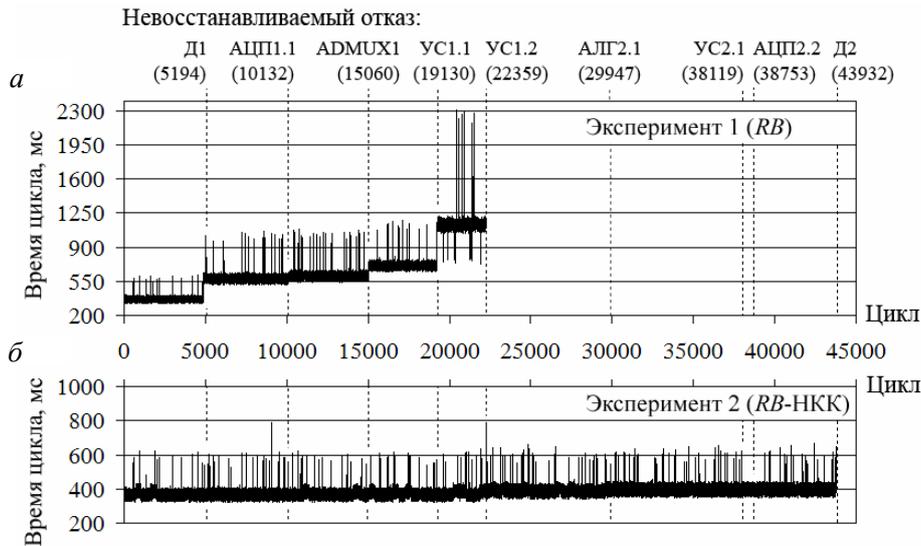
1) интенсивности отказов элементов постоянны, проводится ускоренное моделирование, используется модельное время (в условных единицах);

2) вероятность отказов элементов при моделировании не зависит от времени функционирования и выражается отношением количества отказов элемента к числу операций с использованием данного элемента;

3) имитационный эксперимент прекращается в случае фатального отказа.

Для оценки эффективности использования разработанной методики проведено два имитационных эксперимента: эксперимент 1 с использованием метода *RB* и эксперимент 2 с использованием метода *RB-НКК*.

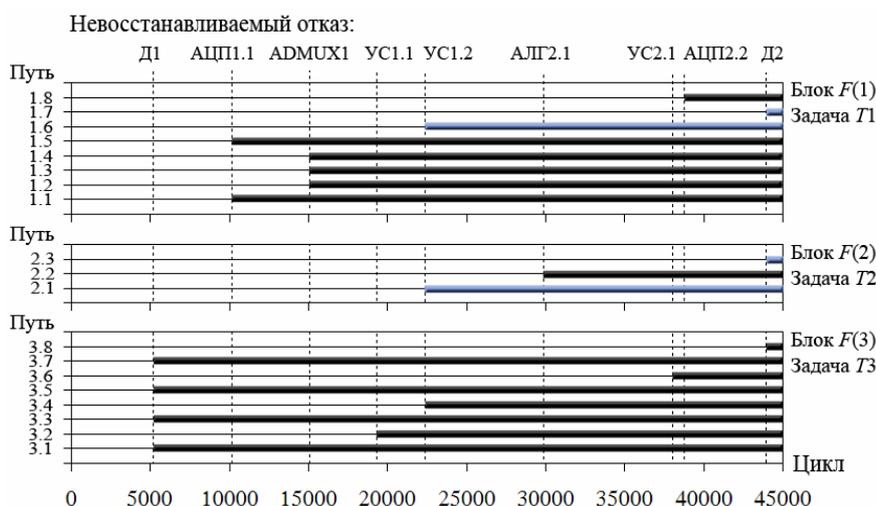
Получены зависимости общего времени выполнения задач основного цикла для каждой итерации с момента запуска ПАВК СУБ для блоков обеспечения отказоустойчивости на базе методов *RB* (рис. 7,а) и *RB-НКК* (рис 7,б).



**Рисунок 7.** Результаты сравнительного моделирования

В эксперименте 1 на итерациях после возникновения очередного невосстанавливаемого отказа элемента значительно увеличивается время цикла и амплитуда всплесков значений времени цикла в случае сбоев. Это обусловлено тем, что при выборе пути с помощью метода *RB* не учитывается предыстория отказов элементов, включенных в путь, и вероятность отказа пути. При использовании метода *RB-НКК* возможно предоставление необходимого качества обслуживания при более жестких условиях (при уменьшении допустимого времени выполнения цикла в 3 раза).

На рис. 8 представлены графики, отображающие изменение значений элементов матрицы запретов (эксперимента 2), используемой при выборе пути в методе *RB-НКК*. Для каждого пути отмечен интервал итераций, на котором путь считается запрещенным (не выбирается). За счет использования матрицы запретов в методе *RB-НКК* время до фатального отказа системы увеличивается в 1,9 раза: в эксперименте 2 фатальный отказ – отказ Д2 (в эксперименте 1 – отказ УС1.2). В эксперименте 2 при возникновении невосстанавливаемых отказов элементов УС1.2 и УС1.1 при выполнении блока *F*(2) не используется путь «2.1», содержащий элемент АЛГ1, так как это приводит к необходимости выбора в блоке *F*(3) пути, содержащего УС1.2 и УС1.1. Одновременно в блоке *F*(1) формируется запрет выбора пути «1.6», приводящего к необходимости выбора пути «2.1» блока *F*(2). Этот механизм позволяет увеличить живучесть системы.



**Рисунок 8.** Изменение значений матрицы запретов

Для экспериментов 1 и 2 с помощью обработки данных первых 20000 итераций рассчитаны параметры функционирования ПАВК СУБ (табл. 1).

Таблица 1 – Результаты сравнительного моделирования

№ п/п	Параметр функционирования ПАВК СУБ (20000 итераций)	Значение параметра	
		Метод <i>RB</i>	Метод <i>RB-НКК</i>
1	Среднее время выполнения итерации $T_{\text{СВЫП}}$ , у.е.	582,78	369,62
2	Среднее время выполнения задачи $T_0$ , у.е.	124,67	57,21
3	Количество восстанавливаемых отказов элементов	228	135
4	Средняя наработка на отказ $T_{\text{СН}}$ , у.е.	87719	148154
5	Среднее время восстановления $T_{\text{В}}$ , у.е.	2,215	0,832
6	Коэффициент готовности $K_{\Gamma}$	0,999975	0,999994

Сформулированные преимущества метода *RB-НКК* по сравнению с *RB* и приведенные результаты подтверждают эффективность применения предложенной методики проектирования и системы обеспечения отказоустойчивости ПАВК СУБ с использованием метода *RB-НКК*: средняя наработка на отказ увеличена в 1,7 раза; среднее время восстановления после отказа уменьшено в 2,6 раза; коэффициент готовности увеличен.

Проведенная оценка ресурсоемкости метода *RB-НКК* показала, что современные СВУ с большим запасом (по объему памяти и быстродействию) позволяют реализовать этот метод в ПАВК СУБ.

**В заключении** приводятся основные результаты и выводы по работе.

**В приложении** приводится исходный текст программы для проведения имитационных экспериментов на основе предложенной методики моделирования.

## ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

1. Разработана структура системы обеспечения отказоустойчивости ПАВК СУБ, основанная на программном и аппаратном тестировании его модулей, отличающаяся тем, что принятие решения о реконфигурации осуществляется с использованием НКК и обработки информации о результатах тестирования, что позволяет обеспечивать отказоустойчивость с необходимым качеством обслуживания или живучесть комплекса.

2. Разработан метод обеспечения отказоустойчивости, основанный на применении  $N$ -версионного проектирования и блока восстановления, отличающийся тем, что управление избыточностью во времени осуществляется с помощью оценки эффективности использования резервов на основе значений концептов НКК и контролируемых параметров. По сравнению с известным методом на базе блока восстановления предложенный метод позволяет увеличить коэффициент готовности ПАВК СУБ, увеличить в 1,9 раза время до фатального отказа системы, обеспечить необходимое качество обслуживания даже при ужесточении критерия качества обслуживания в 3 раза.

3. Разработана методика проектирования отказоустойчивого ПАВК СУБ, отличающаяся тем, что расчетные характеристики элементов и структура этого комплекса используются для создания НКК, что позволяет реализовать систему обеспечения отказоустойчивости ПАВК СУБ с использованием предложенного метода обеспечения отказоустойчивости. Методика может быть использована для реализации системы обеспечения отказоустойчивости ПАВК реального времени, имеющих неоднородную структуру с множеством разнородных вариантов реконфигурации.

4. Разработано алгоритмическое обеспечение: алгоритм реконфигурации блока обеспечения отказоустойчивости, отличающийся тем, что выбор варианта реконфигурации осуществляется с использованием НКК и матрицы запретов, алгоритм функционирования системы обеспечения отказоустойчивости ПАВК СУБ и соответствующее математическое обеспечение, позволяющие повысить отказоустойчивость комплекса и являющиеся основой для реализации предложенной методики проектирования и системы обеспечения отказоустойчивости ПАВК СУБ.

5. Экспериментально подтверждена эффективность применения разработанной методики проектирования и системы обеспечения отказоустойчивости ПАВК СУБ. Отличительной особенностью является использование метода на основе блока восстановления и алгоритмов реконфигурации на базе НКК. Проведенная оценка ресурсоемкости подтвердила возможность использования этого метода в ПАВК СУБ. Разработанная методика проектирования отказоустойчивого ПАВК СУБ с применением предложенного метода принята к использованию в НИИ ТС «Пилот» для повышения отказоустойчивости системы управления процессом направленного бурения.

## ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

### *В рецензируемых журналах из списка ВАК*

1. Применение нечетких когнитивных карт для обеспечения отказоустойчивости специализированного вычислительного устройства / **А.Ю. Егоршин, А.И. Фрид, А.В. Кудрявцев, А.С. Шулаков** // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. М. : Научтехлитиздат, 2007. №9. С. 1–7.

### *В других изданиях*

2. Отказоустойчивая вычислительная система на основе нечеткой когнитивной карты / **А.Ю. Егоршин, А.И. Фрид** // Интеллектуальные системы управления и обработки информации : сб. матер. Всерос. молодежн. науч.-техн. конф. с междунар. участ. Уфа : УГАТУ, 2003. С. 13.

3. Реконфигурация ПО вычислительных систем с использованием нечетких когнитивных карт / **А.Ю. Егоршин, А.И. Фрид** // XXX Гагаринские чтения : сб. матер. Междунар. молодежн. науч. конф. М. : МАТИ, 2004. Т. 5. С. 81–82.

4. Концептуальный аспект обеспечения отказоустойчивости программно-аппаратных вычислительных комплексов / **А.Ю. Егоршин, А.И. Фрид** // Компьютерные науки и информационные технологии, CSIT'2004 : сб. науч. тр. 6-й междунар. конф. Венгрия, Будапешт, 2004. Т. 1. С. 43–49. (На англ. яз.)

5. Обеспечение живучести аппаратно-программного комплекса управляющих систем с использованием средств искусственного интеллекта / **А.Ю. Егоршин, А.И. Фрид** // Радиоэлектроника, электротехника и энергетика : матер. 10-й Междунар. науч.-техн. конф. студентов и аспирантов. М. : МЭИ, 2004. Т. 1. С. 363–364.

6. Обеспечение живучести аппаратно-программного комплекса управляющих систем с использованием средств искусственного интеллекта / **А.Ю. Егоршин, А.И. Фрид** // Вычислительные сети. Теория и практика (ВС/NW) [Электронный ресурс] : электрон. журн. М. : МЭИ, 2004. №1 (4). 2 с.

7. Сравнительное экспериментальное исследование отказоустойчивых программно-аппаратных вычислительных комплексов / **А.Ю. Егоршин, А.И. Фрид** // Компьютерные науки и информационные технологии, CSIT'2005 : сб. науч. тр. 7-й междунар. конф. Уфа–Ассы, 2005. Т. 1. С. 210–214. (На англ. яз.)

8. Экспериментальное исследование концепции обеспечения отказоустойчивости на основе нечетких когнитивных карт / **А.Ю. Егоршин** // Интеллектуальные системы обработки информации и управления : сб. ст. Рег. зимн. шк.-сем. аспирантов и молодых ученых. Уфа : Технология, 2006. Т. 2. С. 89–97.

9. Свид. об офиц. рег. программы для ЭВМ № 2006611893. Отказоустойчивая система управления реального времени мобильными объектами / **А.Ю. Егоршин**. М. : Роспатент, 2006. Зарег. 31.05.2006.

10. Свид. об офиц. рег. программы для ЭВМ № 2006611911. Отказоустойчивая система управления реального времени мобильного объекта / **А.Ю. Егоршин**. М. : Роспатент, 2006. Зарег. 02.06.2006.

11. Отказоустойчивый программно-аппаратный управляющий вычислительный комплекс на основе нечетких когнитивных карт / **А.Ю. Егоршин, А.И. Фрид** // Новые программные средства для предприятий Урала : сб. науч. тр. Магнитогорск : МГТУ, 2006. Вып. №5. С. 29–37.

12. Реализация программно-аппаратного управляющего вычислительного комплекса на основе нечетких когнитивных карт / **А.Ю. Егоршин** // Интеллектуальные системы обработки информации и управления : сб. ст. 2-й Рег. зимн. шк.-сем. аспирантов и молодых ученых. Уфа : Технология, 2007. Т. 1. С. 201–206.

ЕГОРШИН Артем Юрьевич

ОТКАЗОУСТОЙЧИВЫЕ  
ПРОГРАММНО-АППАРАТНЫЕ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫЕ КОМПЛЕКСЫ  
СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ БУРЕНИЕМ  
С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ ПОДДЕРЖКИ  
ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ

Специальность

05.13.01 – Системный анализ, управление и обработка информации

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Подписано в печать 21.11.2007. Формат 60x84 1/16.

Бумага офсетная. Печать плоская. Гарнитура Times New Roman.

Усл. печ. л. 1,0. Усл. кр-отт. 1,0. Уч.-изд. л. 0,9.

Тираж 100 экз. Заказ № 571

ГОУ ВПО Уфимский государственный авиационный технический университет  
Центр оперативной полиграфии  
450000, Уфа-центр, ул. К.Маркса, 12