

**МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ  
ДОНЕЦКОЙ НАРОДНОЙ РЕСПУБЛИКИ  
ГОСУДАРСТВЕННОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ  
ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ  
«ДОНЕЦКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

*На правах рукописи*



**ИВАНИЦА СЕРГЕЙ ВАСИЛЬЕВИЧ**

**ОБОСНОВАНИЕ ЗАКОНОМЕРНОСТЕЙ, АРИФМЕТИКО-  
ЛОГИЧЕСКИХ АЛГОРИТМОВ И СТРУКТУР СИСТЕМ  
КОМПЬЮТЕРНОЙ ОБРАБОТКИ ИНФОРМАЦИИ**

Специальность 05.13.01 – Системный анализ,  
управление и обработка информации (по отраслям) (технические науки)

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Донецк – 2019

Работа выполнена в ГОУВПО «ДОНЕЦКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ  
ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ», г. Донецк

**Научный руководитель:** кандидат технических наук, доцент  
**Аноприенко Александр Яковлевич,**  
ГОУВПО «ДОНЕЦКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ  
ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»,  
(г. Донецк), ректор

**Официальные оппоненты:**

**Ведущая организация:**

Защита состоится «\_\_» \_\_\_\_\_ 20\_\_ г. в \_\_\_\_ часов на заседании  
диссертационного совета Д 01.024.04 при ГОУВПО «ДОННТУ» и ГОУВПО  
«ДОННУ» по адресу: 283001, г. Донецк, ул. Артема, 58, корп. 1, ауд. 203  
Тел./факс: 380(62) 304-30-55, e-mail: uchensovnet@donntu.org.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ГОУВПО «ДОННТУ»  
по адресу: 283001, г. Донецк, ул. Артема, 58, корп. 2. Адрес сайта университета:  
<http://donntu.org>

Автореферат разослан «\_\_» \_\_\_\_\_ 20\_\_ г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета Д 01.024.04  
кандидат технических наук

Т.В. Завадская

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы исследований.** Постоянное увеличение насыщенности современной техносферы компьютерными технологиями сопряжено с практически экспоненциальным ростом объемов вычислений. Это существенно актуализирует вопросы обеспечения эффективности и надежности средств и методов современного компьютеринга, направленного на повышение точности вычислений в процессе моделирования и проектирования сложных динамических систем.

Установлено, в частности, что многие техногенные катастрофы последних десятилетий были в первую очередь обусловлены разного рода недостатками компьютерных систем управления и вычислительными ошибками. Но в большинстве случаев ошибки в вычислениях просто остаются незамеченными, существенно искажая полученные результаты.

В связи с этим следует признать, что в настоящее время созрели все предпосылки для существенной модификации всей системы компьютерных вычислений с целью повышения ее надежности и соответствию требованиям, предъявляемым к современному компьютерингу. При этом речь может идти о дальнейшем развитии как логической, так и вычислительной составляющей современного компьютеринга. Особо актуальной является разработка такой модификации вычислений с плавающей запятой, которая позволила бы исключить потерю точности (и информации о ней) при представлении входных, промежуточных и результирующих значений в форматах с плавающей запятой.

В связи с этим обоснование закономерностей и перспектив арифметико-логических основ систем компьютерной обработки информации является **актуальной** научно-технической задачей.

**Степень разработанности темы исследования.** Теоретической базой для проведения исследований стали работы ведущих отечественных и зарубежных ученых и их учеников, таких как: Ракитов А. И., Чернышов В. Н., Вентцель Е. С., Антонов А. В., Волкова А. С., Садовский В. Н., О'Коннор Дж., Блауберг И. В., Громов Ю. Ю. и др. (в области системного анализа и системного подхода); Заде Л. А., Лукасевич Я., Бочвар Д. А., Клини С. К., Белнап Н. Д., Горбатов А. В., Зверев Г. Н., Аноприенко А. Я. и др. (в области построения логических моделей и расширения кодо-логического базиса); Калмыков С. Л., Алефельд Г., Хансен Е., Мур Р., Вошинин А. П., Шокин Ю. И., Назаренко Т. И., Шарый С. П. и др. (в области математического и интервального анализа, интервальной арифметики); Брадис В. М., Никель К., Яблонский С. В., Канторович Л. В., Юровицкий В. М., Петров Ю. П.,

Литвинов Г. Л. и др. (в области компьютерной обработки информации, достоверности и надежности компьютерных расчетов).

Несмотря на значительный объем исследований в каждой из указанных научных областей, актуальность темы диссертации остается значимой, так как в используемой литературе не прослеживаются связи, например, между  $k$ -значными логиками и вопросами достоверности и надежности компьютерных вычислений, а, тем более, с интервальным подходом представления цифровой информации. Кроме того, лишь единицы научных работ рассматривают исследуемую сложную систему (в частности, вычислительную) в комплексе, отвечая на вопросы достоверности вычислений, и решая при этом всю последовательность задач: начиная от вопросов представления (кодирования) информации, ее обработки (арифметика и логика), до проблем, связанных с получением достоверных результатов. В качестве типичного примера такого рода можно привести полином Румпа (впервые опубликован в 1988 году), который при определенном сочетании значений переменных дает заведомо неправильный результат при всех стандартных значениях точности вычислений с плавающей запятой практически на всех современных компьютерных системах.

**Целью исследования** является совершенствование современных компьютерных технологий путем расширения кодо-логического базиса с последующей реализацией новых подходов к модернизации систем компьютерной обработки информации.

Для достижения поставленной цели сформулированы и решены следующие **задачи**:

1. Аналитический обзор исследований в области арифметико-логических основ компьютерной вычислительной техники при выполнении компьютерных вычислений с выявлением достоверности полученных результатов.

2. Разработка расширенного кодо-логического базиса как следующего этапа развития арифметико-логических систем.

3. Разработка специализированных форматов чисел с плавающей запятой, использующих постбинарное кодирование для хранения и обработки числовой информации с возможностью получения достоверных результатов.

4. Разработка новых инструментов компьютерных вычислений с применением постбинарной логики и постбинарного кодирования.

5. Модификация существующих алгоритмов для реализации арифметических операций над числами при использовании тетракодирования в специализированных форматах с плавающей запятой.

**Объект исследования.** Аппаратно-программные средства компьютерных технологий, предназначенные для решения задач обработки информации (вычислений).

**Предмет исследования.** Кодо-логический базис, постбинарная логика и кодирование информации для выполнения арифметических и логических преобразований.

**Методология и методы исследований.** Исследования, проведенные в работе, базируются на системном анализе, теории информации, формальных логических моделях представления и обработки информации, аксиоматическом аппарате теории множеств, оптимизации и обработки информации, теории кодирования, принципах построения логических систем, вещественной арифметики.

Теоретической базой исследования арифметико-логических основ компьютерной обработки информации явились научные труды отечественных и зарубежных авторов, посвященные проблемам кодо-логического базиса, вычислений чисел в форматах с плавающей запятой, используемых в современных компьютерных технологиях.

При проведении исследований, для получения анализируемых результатов проводились вычисления с помощью ЭВМ. Применялись как системы компьютерной алгебры, так и разработанное в рамках исследования прикладное программное обеспечение.

**Научная новизна** полученных результатов заключается в следующем:

1. В качестве компьютерного логического базиса предложена тетралогика как логика четырех состояний, которая кроме классических состояний «истина» и «ложь» использует новые логические состояния «неопределенность» и «множественность». Для тетралогии предложены и обоснованы классы логических  $n$ -арных функций (тетрафункций).

2. При переходе от тетралогии к тетракодам определены принципы кодирования/декодирования исходных числовых величин. Показано, что принципы кодирования тетракодов имеют интервальную природу, т. е. способны хранить интервальные значения в поле одного тетракода-операнда.

3. Впервые разработаны базовые арифметические операции над тетракодами (тетраарифметика) с приведением доказательств основных алгебраических тождеств.

4. Предложены модифицированные (постбинарные) форматы чисел с плавающей запятой, использующие бинарные коды и тетракоды, а также хранящие в поле формата информацию о типе чисел (число, обыкновенная дробь, интервал) и способе их кодирования (бинарное, постбинарное). Показаны оценки максимальной погрешности при кодировании чисел в

модифицированные форматы, которые не уступают значениям погрешностей, возникающих при кодировании и обработке чисел в классических форматах чисел с плавающей запятой.

5. Впервые предложен новый способ округления чисел в постбинарных форматах чисел с плавающей запятой, при котором в одном поле формата записываются значения двух точек разрядной сетки, между которыми находится исходное действительное число. Такой подход позволяет либо избежать погрешностей, появляющихся в результате округления чисел, либо снизить погрешности при кодировании в два раза (зависит от положения реального числа по отношению к разрядной сетке используемого формата).

**Теоретическая и практическая значимость работы.** Теоретическая значимость результатов работы заключается в определении операций и функций новой логики и арифметики, на основе которых возможны разработки аппаратных компонентов, основанных на классических логических примитивах, что в дальнейшем может быть использовано в качестве аппаратной основы компьютерных систем следующих поколений.

Практическое значение результатов исследований:

1. Разработан необходимый и достаточный логический базис для дальнейшей реализации операционных аппаратных компонентов (управляющие схемы, сумматоры, арифметико-логические устройства, устройства памяти и пр.).

2. Определены основные арифметические операции над тетрадами, при применении которых появляется возможность создания алгебраических специализированных модулей для расчета практических вычислительных задач любой сложности.

3. Разработаны алгоритмы постбинарного округления чисел, уточнены алгоритмы арифметики с плавающей запятой, которые применяются к постбинарным типам данных в виде числовых, дробных и интервальных значений.

4. Приведены рекомендации к использованию модифицированных форматов чисел с плавающей запятой в виде спецификаций, в которых указаны размерности каждого поля и рассчитаны необходимые числовые диапазоны.

Практическое значение полученных результатов подтверждается внедрением в государственном предприятии «СТИРОЛ» (справка о внедрении № 327/4 от 18.10.19 г. выдана ГП «СТИРОЛ», г. Горловка), а также в учебный процесс ГОУВПО «ДОНЕЦКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ» (справка № 01-508/27 от 16.10.19 г. принята к внедрению в учебный процесс при чтении лекций и проведении практических занятий по дисциплине «Арифметико-логические основы цифровых автоматов» для

студентов направления подготовки 09.03.01 «Информатика и вычислительная техника»).

**Научные положения**, выносимые на защиту:

1. Обоснование тетралогии как логики четырех состояний с получением базовых функций (тетрафункций), которая позволит значительно расширить возможности формализованной логической оценки разнообразных реальных процессов и результатов.

2. Новые принципы кодирования информации – тетракодирование с методами приведения новых кодов (тетракодов) к интервальным значениям; определение и свойства арифметических операций над тетракодами, что позволяет использовать тетракодирование для обеспечения достоверных вычислений путем уменьшения погрешности округления при компьютерной обработке информации.

3. Обоснованы варианты реализации постбинарных форматов с плавающей запятой и способы представления вещественных чисел в постбинарных форматах, использование которых позволяет повысить точность представления числовых значений на всех этапах компьютерной обработки информации.

**Полученные результаты, положения и выводы** отвечают соответствующим требованиям паспорта специальности 05.13.01 – Системный анализ, управление и обработка информации (по отраслям) (технические науки), в частности: п. 4 – «Разработка методов и алгоритмов решения задач системного анализа, оптимизации, управления, принятия решений и обработки информации»; п. 5 – «Разработка специального математического и алгоритмического обеспечения систем анализа, оптимизации, управления, принятия решений и обработки информации»; п. 8 – «Теоретико-множественный и теоретико-информационный анализ сложных систем».

**Публикации.** По теме диссертации опубликовано 23 научных труда в научно-технических журналах, сборниках докладов, научно-технических сборниках, научных изданиях, в том числе: 2 монографии; 2 статьи в научных изданиях, включенных в Перечень ВАК Донецкой Народной Республики; 9 статей в научных изданиях, включенных в Перечень ВАК Украины; 6 публикаций по материалам научных конференций

**Апробация результатов диссертации.** Основные положения и научные результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на научных конференциях: IV Международная научно-техническая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Моделирование и компьютерная графика» (г. Донецк, 2011 г.); II Всеукраинская научно-техническая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Информационные управляющие системы и компьютерный мониторинг» (г. Донецк, 2011 г.); VII Международная научно-

техническая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Информатика и компьютерные технологии» (г. Донецк, 2011 г.); Международная научно-техническая конференция «Искусственный интеллект. Интеллектуальные системы» (пос. Кацивели, АР Крым, 2012 г.); V Международная научно-техническая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Информационные управляющие системы и компьютерный мониторинг» (г. Донецк, 2014 г.); I Международная научно-практическая конференция «Инновационные перспективы Донбасса: Компьютерные науки и технологии» (г. Донецк, 2015 г.).

**Структура и объем работы.** Диссертационная работа содержит 228 страниц машинописного текста и состоит из введения, пяти глав, заключения, списка литературы из 155 источников на 19 страницах и 10 приложений на 46 страницах. Основной текст, изложенный на 164 страницах, иллюстрируется 54 рисунками и содержит 23 таблицы.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Введение** содержит общую характеристику работы. Обоснована актуальность темы диссертации, сформулированы цели и задачи исследований. Показаны научная новизна и практическое значение полученных результатов.

В **первой главе** рассматривается состояние вопроса развития арифметико-логических основ компьютерных технологий. Выполнены обзор и анализ основных исследований и разработок в области обеспечения контроля точности и достоверности результатов современного компьютеринга. Предложены пути возможного повышения эффективности вычислений современного компьютеринга, а также выделены особенности применения интервального анализа для обеспечения достоверных результатов в компьютерных вычислениях. Также определена методика системного анализа закономерностей и перспектив развития арифметико-логических основ компьютерных вычислений.

Во **второй главе** разработаны основные теоретические положения тетралогии. В качестве наиболее перспективного варианта, из всех возможных сочетаний логических состояний (или высказываний) в тетралогии, рассматриваются четыре: классические «истина» (1) и «ложь» (0); значения неопределенности (А) и множественности (М). Данный вариант тетралогии (Рисунок 1) представлен в виде множества четырех состояний  $L_4 = \{0, A, M, 1\}$ .



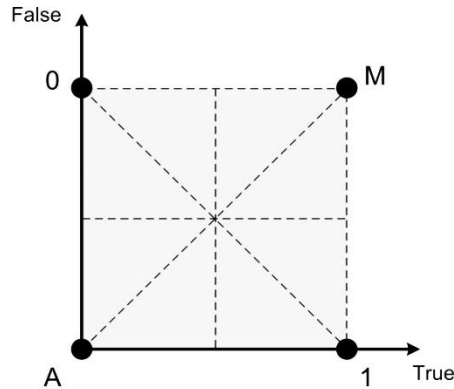


Рисунок 1 – Двумерное логическое пространство с указанными логическими значениями рассматриваемого варианта тетралогики

Определены и проанализированы одноместные и двуместные логические операции тетралогики. Доказаны основные тождества операций тетралогики (тетрафункций), выведены закономерности и таблицы истинности инверсии, логического умножения и сложения тетралогики, показана их функциональная полнота, а также определен ряд других функций тетралогики двух переменных  $Tr^2(x, y)$  (Таблица 1).

Таблица 1 – Таблица истинности тетрафункций двух переменных  $Tr^2(x, y)$

$x$	0	0	0	0	A	A	A	A	M	M	M	M	1	1	1	1
$y$	0	A	M	1	0	A	M	1	0	A	M	1	0	A	M	1
$\bar{x}$	1	1	1	1	M	M	M	M	A	A	A	A	0	0	0	0
$x \vee y$	0	A	M	1	A	A	1	1	M	1	M	1	1	1	1	1
$x \wedge y$	0	0	0	0	0	A	0	A	0	0	M	M	0	A	M	1
$x \oplus y$	0	A	M	1	A	0	1	M	M	1	0	A	1	M	A	0
$x \downarrow y$	1	M	A	0	M	M	0	0	A	0	A	0	0	0	0	0
$x   y$	1	1	1	1	1	M	1	M	1	1	A	A	1	M	A	0
$x \rightarrow y$	1	1	1	1	M	1	M	1	A	A	1	1	0	A	M	1
$x \leftarrow y$	1	M	A	0	1	1	A	A	1	M	1	M	1	1	1	1
$x \leftrightarrow y$	1	M	A	0	M	1	0	A	A	0	1	M	0	A	M	1

**Третья глава** посвящена принципам тетракодирования и разработке на их основе постбинарных вычислений (компьютерных вычислений, в которых в качестве входных данных и полученных результатов выступают постбинарные коды, отображающие числовые данные). Состояния тетралогики могут

кодироваться тетракодом, представленным в виде значений  $S_4 = \{0, A, M, 1\}$  и используемым по аналогии с бинарным кодом для поразрядного представления количественных значений. По аналогии с понятием «бит», для поразрядного представления тетракода используется понятие «тетрит»:

– тетриты 0 и 1 приводятся к битам 0 и 1 соответственно, так как они кодируют аналогичные значения;

– тетрит M приводится к битам 0 и 1 одновременно, поэтому представляется двумя точками на числовой оси;

– тетрит A приводится к битам 0 или 1 (в момент сведения его значение неизвестно), поэтому представляется одной из двух возможных точек на числовой оси.

Значение тетракода сводится к отображению двоичных чисел, при этом ширина полученного интервала зависит, прежде всего, от позиции группы M в тетракоде, а точнее – от позиции старшего тетрита поля M. Поэтому ширина интервала  $\text{wid } x$ :

$$\text{wid } x = 2^{k+1} - 1,$$

где  $k$  – позиция старшего тетрита, равного M в  $n$ -разрядном тетракоде:  $n-1 \leq k \leq 0$ .

Нормированный тетракод, содержащий поля M и A при декодировании предполагает определение расстояния  $q$  между значениями минимально и максимально возможных границ  $x_1^{\min}$ ,  $x_2^{\min}$  и  $x_1^{\max}$ ,  $x_2^{\max}$  для интервалов  $x^{\min} = [x_1^{\max}, x_2^{\min}]$  и  $x^{\max} = [x_1^{\min}, x_2^{\max}]$ , имеющих ширину  $\text{wid } x^{\min}$  и  $\text{wid } x^{\max}$  соответственно (Рисунок 2):

$$q = x_1^{\max} - x_1^{\min} = x_2^{\max} - x_2^{\min}.$$

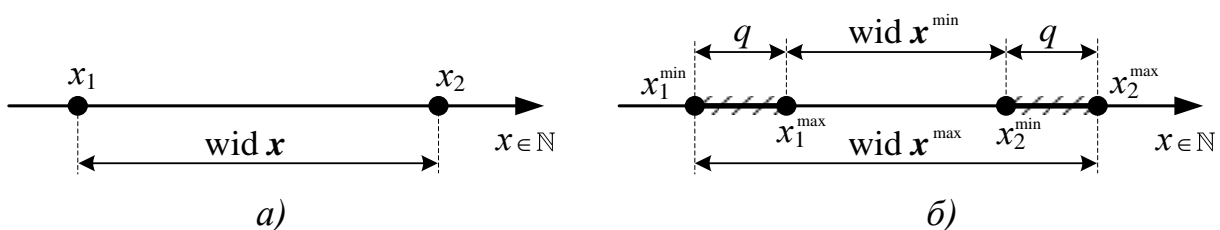


Рисунок 2 – Формирование целочисленных интервальных границ при декодировании нормированного тетракода содержащего только группу M (a) и группы M и A (б)

При декодировании нормированного тетракода с полями M и A к интервальным границам, расстояние  $\text{wid } x^{\max}$  между крайними точками  $x_1^{\min}$  и  $x_2^{\max}$  определяется аналогично  $\text{wid } x$ , поскольку поле A приводится к таким же двоичным значениям, как и для поля M (обнуляются для левой и

устанавливаются в единицу для правой границ интервала):  $\text{wid } \mathbf{x}^{\max} = \text{wid } \mathbf{x}$ . Расстояние  $\text{wid } \mathbf{x}^{\min}$  между точками  $x_1^{\max}$  и  $x_2^{\min}$  связано с  $\text{wid } \mathbf{x}^{\max}$  соотношением,

$$\text{wid } \mathbf{x}^{\min} = \text{wid } \mathbf{x}^{\max} - 2q,$$

откуда

$$q = \frac{1}{2} \cdot (\text{wid } \mathbf{x}^{\max} - \text{wid } \mathbf{x}^{\min}).$$

Последнее равенство определяет  $q$  как расстояние между двумя интервалами шириной  $\text{wid } \mathbf{x}^{\min}$  и  $\text{wid } \mathbf{x}^{\max}$ . При этом, согласно свойствам интервального анализа,  $q$  – это расстояние на интервальном множестве  $\mathbb{IR}$  как целочисленных, так и вещественных интервалов (поскольку, если  $\mathbb{R} \supset \mathbb{Z}$ , то и  $\mathbb{IR} \supset \mathbb{IZ}$ ).

Поскольку тетракод  $C_4 = \{0, A, M, 1\}$  используется для хранения числовой информации, над ним могут быть определены арифметические операции. Для тетракодов  $T_1$  и  $T_2$  может быть определена:

- операция сложения, имеющая запись  $T_1 + T_2$ ;
- операция вычитания, записываемая как  $T_1 - T_2$ ;
- операция умножения, имеющая запись  $T_1 \times T_2$ ;
- операция деления –  $T_1 \div T_2$ , при соблюдении условия  $0 \notin T_2$  (совокупность значений, декодированных из  $T_2$ , не содержит ноль).

Для арифметических операций над тетракодами справедливо большинство свойств аналогичных арифметических операций, определенных над действительными числами. Также для операций сложения и умножения обязательно выполнение свойств коммутативности и ассоциативности. Аналогично интервальной арифметике, свойство дистрибутивности может иметь место в ослабленном виде:  $T_1 \times (T_2 + T_3) \subset T_1 \times T_2 + T_1 \times T_3$ . Данное выражение указывает о субдистрибутивности умножения относительно сложения. Однако при дальнейшей разработке арифметических операций над тетракодами подтвердился факт наличия строгой дистрибутивности умножения относительно сложения.

Сложение двух тетракодов аналогично сложению результирующих интервалов, декодированных из данных тетракодов-операндов.

Если интервал  $t_1^{\min}$  является минимальным интервалом, декодированным из тетракода  $T_1$ , а  $t_2^{\min}$  – минимальный интервал из  $T_2$ , то результатом сложения  $T_1 + T_2$  является такой тетракод  $T_3$ , при декодировании которого полученный минимальный интервал  $t_3$  представляет собой сумму интервалов  $t_1^{\min}$  и  $t_2^{\min}$ . Следует отметить, что при любых значениях двух тетракодов всегда найдется третий тетракод, являющийся суммой двух предыдущих:

$$\forall T_1 \rightarrow t_1^{\min}, T_2 \rightarrow t_2^{\min} \exists T_3 \rightarrow t_3^{\min}: T_1 + T_2 = T_3 \wedge t_1^{\min} + t_2^{\min} = t_3^{\min}.$$

Умножение тетракодов, также как и сложение, эквивалентно интервальному умножению. То есть, если интервал  $t_1$  является минимальным интервалом, декодированным из тетракода  $T_1$ , а  $t_2$  – минимальным интервалом из  $T_2$ , то результатом умножения  $T_1 \times T_2$  является такой тетракод  $T_3$ , при декодировании которого полученный минимальный интервал  $t_3$  представляет собой произведение интервалов  $t_1^{\min} \cdot t_2^{\min}$ . Следует отметить, что при любых значениях двух тетракодов всегда найдется третий тетракод, являющийся произведением двух предыдущих:

$$\forall T_1 \rightarrow t_1^{\min}, T_2 \rightarrow t_2^{\min} \exists T_3 \rightarrow t_3^{\min}: T_1 \times T_2 = T_3 \wedge t_1^{\min} \cdot t_2^{\min} = t_3^{\min}.$$

В диссертационном исследовании получены и доказаны в соответствии с вышеуказанными законами операции сложения и умножения (Таблица 2), на основе которых выполнены операции вычитания и деления.

В **четвертой главе** рассмотрены особенности модификации стандартных форматов чисел с плавающей запятой.

Согласно стандарту IEEE 754-2008, машинным числом с плавающей запятой называют число вида:

$$x_{m,k} = \pm 0, s_1 s_2 \dots s_m \cdot b^e = \pm \left( \frac{s_1}{b^1} + \frac{s_2}{b^2} + \dots + \frac{s_m}{b^m} \right) \cdot b^e = \pm \mu \cdot b^e,$$

где  $b \in \{0, 1, \dots, b-1\}$  – основание системы счисления;  $\mu$  – мантисса числа;  $m$  – длина или размер мантиссы (количество разрядов в мантиссе);  $s_i \in \{0, 1, \dots, b-1\}$ ,  $i = \overline{1, m}$  – значащие цифры ( $s_1 \neq 0$ );  $e$  – порядок числа;  $k$  – размер порядка (количество разрядов в представлении порядка).

Таблица 2 – Результаты арифметических операций над тетракодами

*Сложение*

+	0	A	M	1
0	0	A	M	1
A	A	A0	1	AM
M	M	1	M0	MA
1	1	AM	MA	10

*Умножение*

×	0	A	M	1
0	0	0	0	0
A	0	A	1	A
M	0	1	M	M
1	0	A	M	1

На основании форматов чисел  $\text{binary}\Omega$  стандарта IEEE754-2008 предлагаются *модифицированные форматы*  $\text{rbinary}\Omega$  различной точности (Рисунок 3): от одинарной ( $n = 32$ ) до восьмерной ( $n = 256$ ).

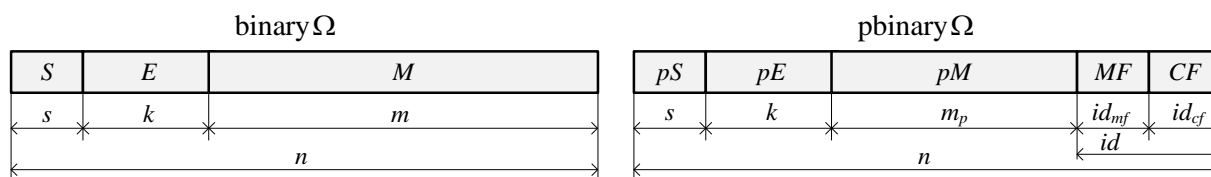


Рисунок 3 – Структура числа в стандартном формате  $\text{binary}\Omega$  и в эквивалентном ему модифицированном формате  $\text{pbinary}\Omega$  с указанием полей формата:  $S$  и  $pS$  – поля знака,  $E$  и  $pE$  – поля порядка  $e$  со смещением,  $M$  и  $pM$  – поля остатка мантииссы,  $MF$  – поле модификатора формата,  $CF$  – поле кода формата ( $n \equiv \Omega$  – количество разрядов формата числа)

На рисунке 4 приведены соотношения разрядности и типов модифицированных форматов, согласно представленным в диссертационном исследовании определениям.

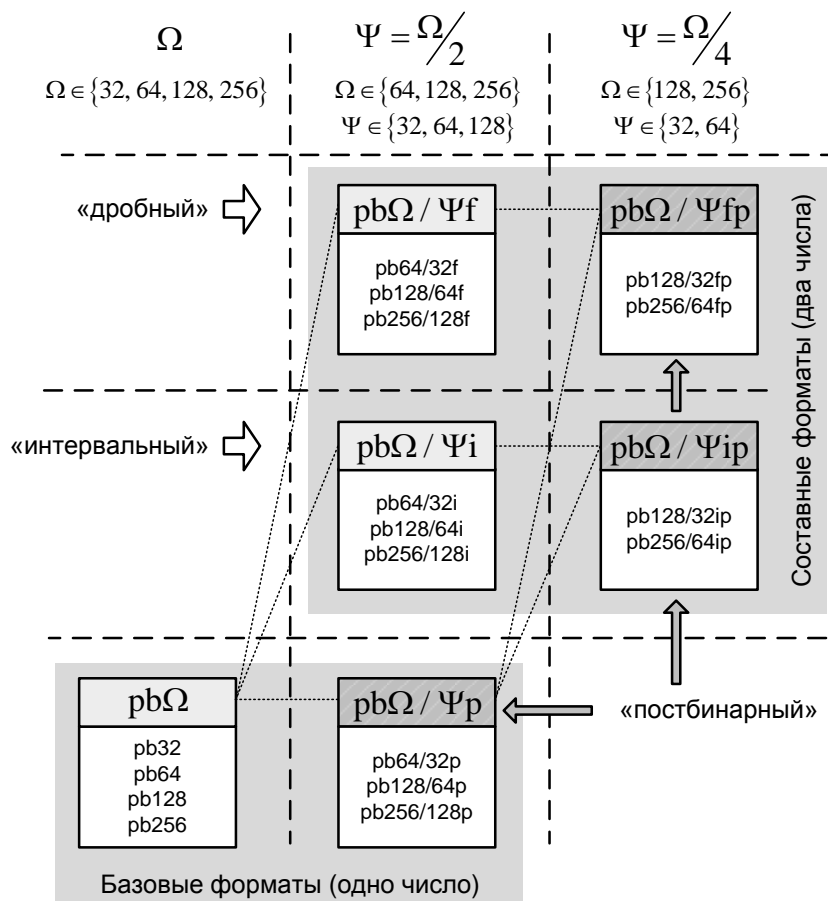


Рисунок 4 – Соотношение модифицированных форматов с указанием способов кодирования и назначения

Введение тетракода как системы кодирования в модифицированных постбинарных форматах  $\text{pb}\Omega/\Psi_p$ ,  $\text{pb}\Omega/\Psi_{fp}$  и  $\text{pb}\Omega/\Psi_{ip}$  позволяет рассмотреть наряду со стандартными способами и новый, модифицированный способ

округления – постбинарное округление. Это такой способ округления к ближайшему числу, в котором числа округляются в пределах  $\frac{1}{4}$  шага числа между точками разрядной сетки формата числа с плавающей запятой (Рисунок 5).

При постбинарном округлении рассматриваются значения двух старших незначащих разрядов (Рисунок 6): при значениях, равных 00 – число находится в участке I вещественной оси – округление к меньшей точке разрядной сетки (отбрасывание незначащих разрядов); при значениях, равных 01 или 10 – число находится в участках II или III вещественной оси – происходит формирование нормированного тетракода в поле мантиисы путем прибавления к мантиисе значения  $M$ ; при значениях, равных 11 – число находится в участке IV вещественной оси – округление к большей точке разрядной сетки (прибавление 1 к полю мантиисы).

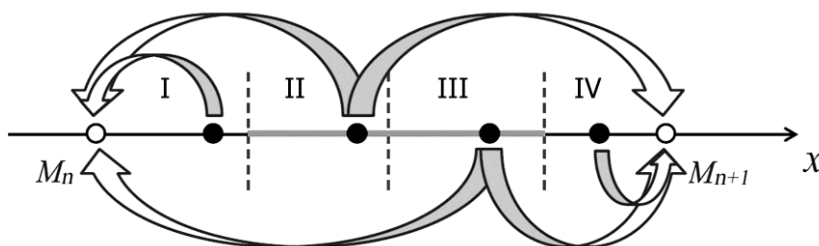


Рисунок 5 – Принцип модифицированного округления чисел в «постбинарных» форматах с плавающей запятой (черные точки – действительные числа на числовой оси, белые точки – точки разрядной сетки формата)

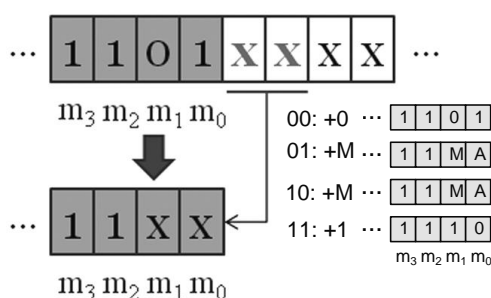


Рисунок 6 – Пример реализации постбинарного округления чисел для модифицированных «постбинарных» форматов с плавающей запятой

Таким образом, при использовании постбинарного округления стало возможным:

- 1) для чисел, лежащих в областях I и IV вещественной оси, уменьшить ошибку точности представления числа, причем абсолютная

максимальная погрешность  $\Delta'_{k,e}{}^{\max}$  для этих чисел в постбинарном формате оказалась равной в пределе четверти шага чисел (Рисунок 7), что в два раза меньше аналогичной абсолютной ошибки  $\Delta_{k,e}{}^{\max}$  для форматов стандарта IEEE 754-2008:

$$\Delta'_{k,e}{}^{\max} = \frac{1}{2} \Delta_{k,e}{}^{\max} = \frac{1}{4} h_{k,e} = 2^{pE_k - \text{offset}_k - m_p - 2}.$$

- 2) числа, лежащие в областях II и III вещественной оси, представлять интервалом, ширина которого равна шагу чисел:  $\text{wid} = h_{k,e}$ .

В пятой главе рассмотрена практическая реализация постбинарных арифметико-логических способов обработки информации. Показаны программная реализация постбинарного кодирования интервалов (Рисунок 8) и разработанный в рамках диссертационного исследования программный преобразователь вещественных чисел в постбинарные форматы чисел с плавающей запятой (Рисунок 9).

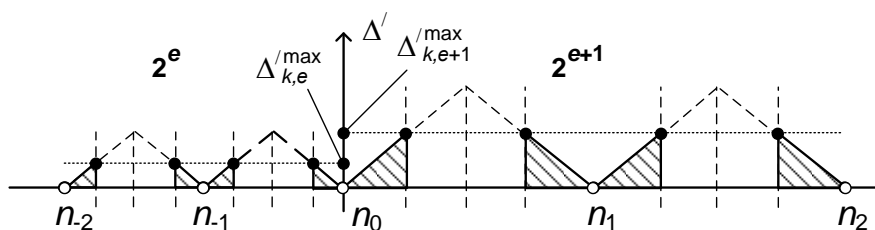


Рисунок 7 – График абсолютной погрешности представления чисел в модифицированных форматах при постбинарном округлении

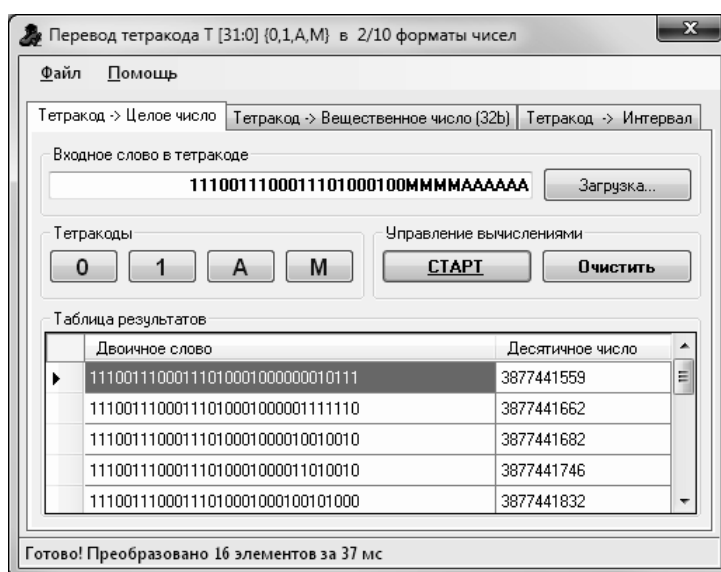


Рисунок 8 – Программа «Перевод 32-разрядного тетракода в 2/10 форматы чисел» (результат работы режима «Тетракод → Целое число»)

Также выполнены анализ и исследование интервальных операций при переходе к постбинарным форматам с плавающей запятой. Для исходного примера вычисление выражения  $B \cdot C - D$  интервальных чисел  $B = [9.258e-6, 9.25805e-6]$ ,  $C = [-0.12484, -0.07031249]$  и  $D = [4.89e-8, 5.681067e-8]$ , представленных в постбинарном интервальном формате `rb128/32ip`, получен интервал-результат в полях интервального постбинарного формата.

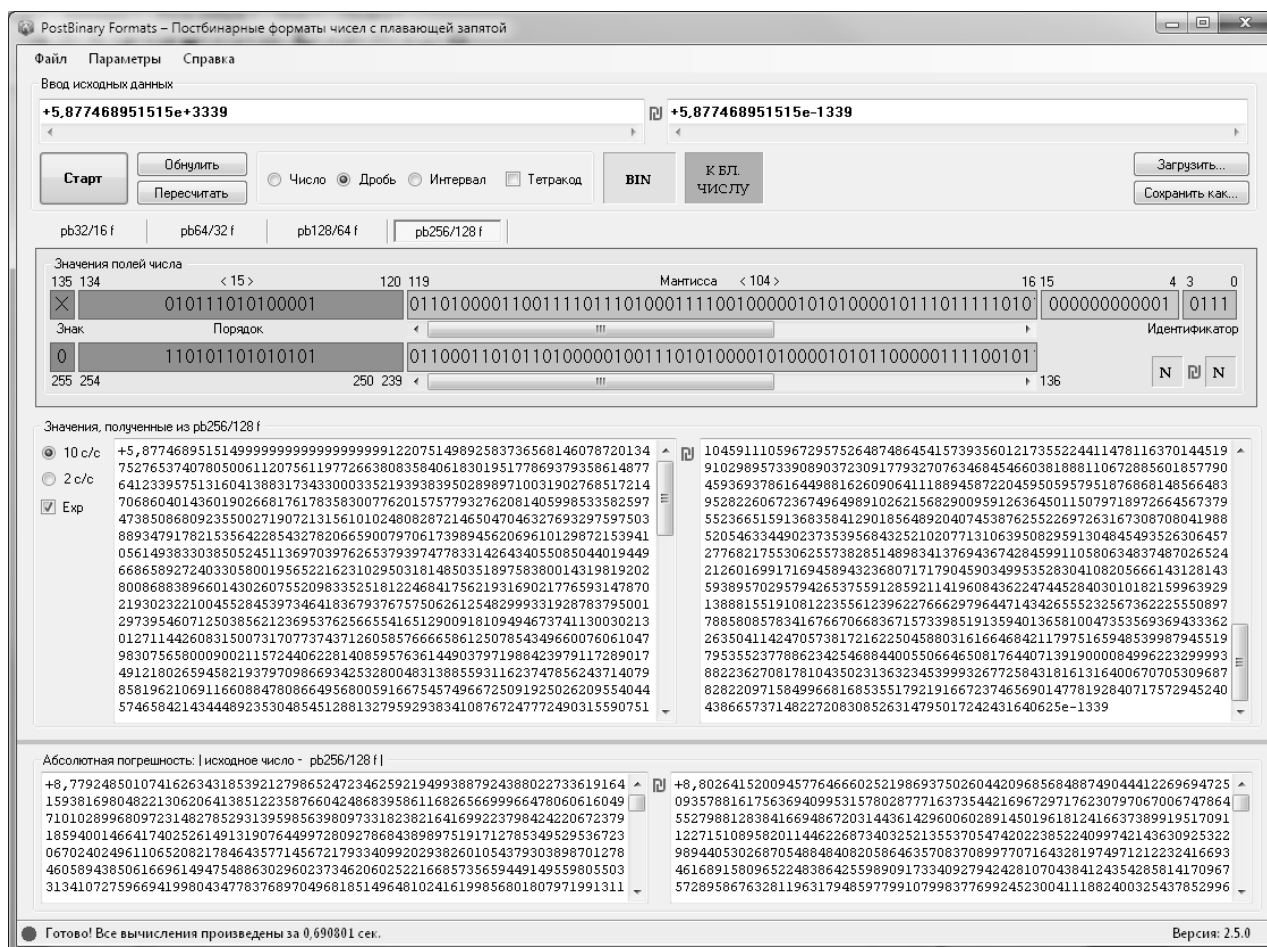


Рисунок 9 – Преобразователь PFC в режиме точного отображения десятичных чисел, извлеченных из полей формата `rb256/128f`

Полученные диапазоны десятичных значений для каждой границы интервала (Рисунок 10) при сравнении с исходными расчетными значениями гарантируют достоверность и обеспечивают учет ошибок округления при кодировании чисел и при проведении арифметических операций над ними. Об этом свидетельствует рисунок 11, в котором диапазоны границ общего интервала  $BC - D$  представлены с учетом знака (для отрицательных чисел: меньше по модулю число является правой границей интервала).



Таким образом, границы полученного интервала сами по себе представляют числовые диапазоны, в которые входят все допущенные погрешности, полученные при контрольном просчете тестового примера.

В результате компьютерных интервальных вычислений, наряду с интервальным приближением количественных величин, упускаются погрешности, возникающие на этапе кодирования значений-границ интервалов в форматах чисел с плавающей запятой. Поскольку интервальная арифметика оперирует только конечными значениями интервальных чисел, то при каждой операции компьютерных интервальных вычислений возможен неконтролируемый рост погрешности представления границ интервала-результата.

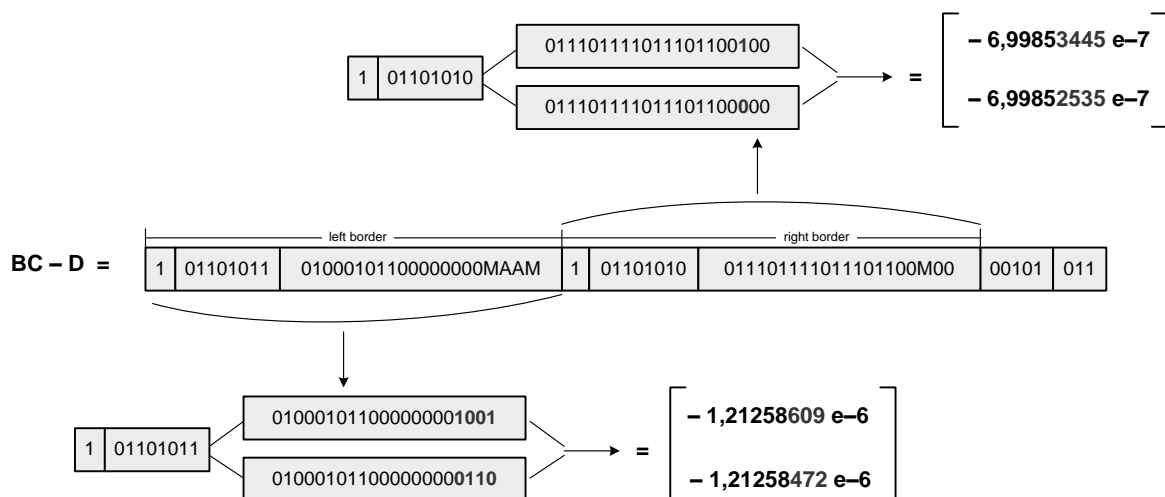


Рисунок 10 – Получение десятичных диапазонов для каждой границы интервала-результата  $BC - D$ , представленного в постбинарном формате pb128/32ip

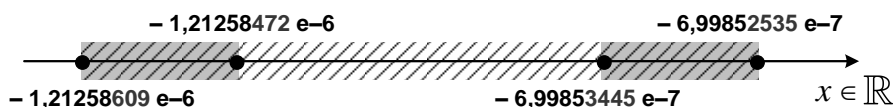


Рисунок 11 – Полученный интервал  $BC - D$  на числовой шкале с выделенными диапазонами левой и правой границ

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертационной работе дано теоретическое обоснование и приведено решение научно-технической задачи разработки концепции постбинарного компьютеринга при переходе к расширенному кодо-логическому базису, которое позволило разработать арифметико-логические основы для обеспечения

достоверности результатов компьютерных вычислений в системах обработки информации.

Результаты диссертационного исследования могут быть сформулированы следующим образом:

1. Рассмотрены вопросы обеспечения эффективности, средства и методы современного компьютеринга. Осуществлен анализ и даны достаточные обоснования для возможности перехода к модификации системы компьютерных вычислений с целью повышения ее надежности и адекватности к современным требованиям путем дальнейшего развития как логической, так и вычислительной составляющей современного компьютеринга.

2. Проанализированы основные тенденции перехода к пространству тетралогии. Реализованы нольместные, одноместные и двуместные логические операции. Выполнены представления функций тетралогии с использованием свойств аппроксимационной решетки и аксиоматического аппарата теории множеств.

3. Разработаны основные методы тетракодирования, с применением которых сформирована методика постбинарных вычислений путем выведения основных свойств арифметических операций над тетракодами.

4. Предложены и обоснованы постбинарные форматы чисел с плавающей запятой различных классов точности, в полях которых содержится информация о способе кодирования хранимых числовых данных и их типе (число, значения числителя и знаменателя дроби, значения границ интервала). Для разработанных форматов предложен метод постбинарного округления, позволяющий записать в поле формата интервальное окружение исходного числа.

5. Представлены примеры программной реализации постбинарного кодирования и постбинарных вычислений, демонстрирующей возможности и особенности реализации идей постбинарного компьютеринга на базе существующих компьютерных технологий.

## СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ АВТОРОМ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

– в рецензируемых научных изданиях, рекомендуемых Министерством образования и науки Донецкой Народной Республики:

1. Иваница, С. В. Синтез постбинарных суммирующих компонентов / С. В. Иваница // Вестник Академии гражданской защиты — 2017. — Вып. 2 (10). — С. 58–67.

2. Иваница, С. В. Системный анализ и исследование интервальных операций при переходе к постбинарным форматам с плавающей запятой / С. В. Иваница // Вестник Академии гражданской защиты. — 2018. — Вып. 4 (16). — С. 103–114.

– в рецензируемых научных изданиях, рекомендуемых Министерством образования и науки Украины:

3. Аноприенко, А. Я. Особенности постбинарного кодирования на примере интервального представления результатов вычислений по формуле Бэйли–Боруэйна–Плаффа / А. Я. Аноприенко, С. В. Иваница // Наукові праці Донецького національного технічного університету. – Донецьк, 2010. – С. 19–23. — (Серія «Інформатика, кібернетика та обчислювальна техніка» ; вип. 11(164).

4. Аноприенко, А. Я. Особенности реализации постбинарных логических операций / А. Я. Аноприенко, С. В. Иваница // Искусственный интеллект. — 2011. — № 2. — С. 110–121.

5. Аноприенко, А. Я. Представление постбинарных форматов чисел с плавающей запятой в контексте интервальных вычислений / А. Я. Аноприенко, С. В. Иваница, С. В. Кулибаба // Наукові праці Донецького національного технічного університету. — Донецьк, 2011. — С. 55–60. — (Серія «Інформатика, кібернетика та обчислювальна техніка»; вип.14(188).

6. Аноприенко, А. Я. Пример Румпа в контексте традиционных, интервальных и постбинарных вычислений / А. Я. Аноприенко, В. А. Гранковский, С. В. Иваница // Наукові праці Донецького національного технічного університету. — Донецьк, 2011. — С. 324–343. — (Серія «Проблеми моделювання та автоматизації проектування» : (МАП-2011) ; вип. 9(179).

7. Иваница, С. В. Особенности реализации операций тетралогии / С. В. Иваница, А. Я. Аноприенко // Наукові праці Донецького національного технічного університету. — Донецьк, 2011. — С. 134–140. — (Серія «Інформатика, кібернетика та обчислювальна техніка»; вип. 13(185).

8. Аноприенко, А. Я. Гибкая разрядность и постбинарные форматы представления вещественных чисел / А. Я. Аноприенко, С. В. Иваница // Вестник инженерной Академии Украины. – 2012. – Вып. 1. – С. 92–98.

9. Аноприенко, А. Я. Представление интервальных чисел средствами постбинарного кодирования / А. Я. Аноприенко, С. В. Иваница // Искусственный интеллект. — 2012. — № 1. — С. 6–16.

10. Иваница, С. В. Оценка погрешности представления вещественных чисел в постбинарных форматах с плавающей запятой / С. В. Иваница // Искусственный интеллект. — 2012. — № 4. — С. 32–44.

11. Аноприенко, А. Я. Особенности представления вещественных чисел в постбинарных форматах / А. Я. Аноприенко, С. В. Иваница // Математичні машини і системи. — 2012. — № 3. — С. 49–60.

**– в других изданиях:**

12. Аноприенко, А. Я. Тетралогики, тетравычисления и ноокомпьютинг: исследования 2010–2012 : монография / А. Я. Аноприенко, С. В. Иваница ; ГВУЗ «ДонНТУ». — Донецк : Технопарк ДонНТУ «УНИТЕХ», 2012. — 308 с.

13. Anopriyenko, A. Software Implementation of Real Number Conversion into Basic Positional Notations with Controlled Accuracy [Electronic resource] / A. Anopriyenko, S. Ivanitsa, S. Kulibaba // International Journal of Advanced Trends in Computer Science and Engineering. – Электрон. дан. – 2013. – Vol. 2, №. 4. — P. 36–40. — Режим доступа: <http://warse.org/pdfs/2013/ ijsait03242013.pdf>. — Загл. с экрана.

14. Anopriyenko, A. Postbinary calculations as a machine – assisted realization of real interval calculations [Electronic resource] / A. Anopriyenko, S. Ivanitsa, A. Hamzah, A. Adnan // International Journal of Science and Applied Information Technology (IJSAIT). — Электрон. дан. — 2014. — Vol. 3, № 6. — Режим доступа: <http://warse.org/ pdfs/2014/ijsait01362014.pdf>. — Загл. с экрана.

15. Иваница, С. В. Проектирование компьютерных компонентов для реализации операций тетралогики / С. В. Иваница // Информатика и кибернетика. — 2017. — № 3(9) — С. 69–76.

**– монографии:**

16. Аноприенко, А. Я. Постбинарный компьютеринг и интервальные вычисления в контексте кодо-логической эволюции : монография / А. Я. Аноприенко, С. В. Иваница. — Донецк : Технопарк ДонНТУ «УНИТЕХ», 2011. — 248 с.

17. Аноприенко, А. Я. Введение в постбинарный компьютеринг. Арифметико-логические основы и программно-аппаратная реализация / А. Я. Аноприенко, С. В. Иваница. — Донецк : ДОННТУ, 2017. — 308 с.

**– публикации по материалам научных конференций:**

18. Аноприенко, А. Я. Особенности представления постбинарных вещественных чисел в контексте интервальных вычислений и развития аппаратного обеспечения средств компьютерного моделирования / А. Я. Аноприенко, С. В. Иваница, С. В. Кулибаба // Моделювання та комп'ютерна графіка : IV міжнар. наук.-техн. конф., 5-8 жовт. 2011 р., м. Донецьк. — Донецк: ДонНТУ, 2011. — С. 13–19.

19. Иваница, С. В. Интервальный анализ и его применение в рамках традиционных и постбинарных вычислений / С. В. Иваница, Хамза Аль-Рабаба, А. Я. Аноприенко // Информатика та комп'ютерні технології : зб. пр. VII міжнар. наук.-техн. конф. студентів, аспірантів та молодих науковців, 22-23 листоп. 2011 р., м. Донецьк / Донец. нац. техн. ун-т. - Донецьк, 2011. — Т. 1. — С. 249–255.

20. Иваница, С. В. Реализация логических операций над элементами тетракодов / С. В. Иваница, А. Я. Аноприенко // Інформаційні управляючі системи та комп'ютерний моніторинг (ІУС КМ-2011) : матеріали II Всеукр. наук.-техн. конф. студентів, аспірантів и молодых вчених, 11-13 квіт. 2011 р., м. Донецьк. — Донецьк, 2011. — Т. 2. — С. 198–202.

21. Иваница, С. В. Методы округления чисел с плавающей запятой, представленных в постбинарных форматах / С. В. Иваница // Искусственный интеллект. Интеллектуальные системы ИИ-2012 : материалы междунар. науч.-техн. конф., АР Крым, пос. Качивели, 1–5 окт. 2012 г. — Донецк, 2012. — С. 33–36.

22. Русинка, Б. В. Организация компьютерных вычислений при многокодовом представлении числовых данных / Б. В. Русинка, С. В. Иваница, Л. И. Дорожко // Інформаційні управляючі системи та комп'ютерний моніторинг (ІУС КМ-2014) : зб. матеріалів V Всеукр. наук.-техн. конф. студентів, аспірантів та молодих вчених, 22-23 квіт. 2014 р., м. Донецьк. — Донецьк, 2014. — С. 236.

23. Лях, А. В. Разработка программной библиотеки для реализации постбинарных вычислений [Электронный ресурс] / А. В. Лях, С. В. Иваница, А. Я. Аноприенко // Инновационные перспективы Донбасса : материалы междунар. науч.-практ. конф., г. Донецк, 20-22 мая 2015 г. / ГВУЗ "ДонНТУ". — Электрон. дан. (1 файл: 13 Мб). — Донецк, 2015. — Т. 5 : Компьютерные науки и технологии. — Систем. требования: Acrobat Reader.

## АННОТАЦИЯ

Иваница С. В. **Обоснование закономерностей, арифметико-логических алгоритмов и структур систем компьютерной обработки информации.** – На правах рукописи.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.13.01 – Системный анализ, управление и обработка информации (по отраслям) (технические науки) – ГОУВПО «ДОНЕЦКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ», г. Донецк, 2019 г.

В диссертационной работе проведено теоретическое обоснование и приведено решение научно-практической задачи разработки концепции постбинарного компьютеринга при переходе к расширенному кодо-логическому базису, которое позволило разработать арифметико-логические основы для обеспечения достоверности результатов компьютерных вычислений.

В качестве компьютерного логического базиса предложена тетралогика как логика четырех состояний, которая кроме классических состояний «истина» и «ложь» использует новые логические состояния «неопределенность» и «множественность». Определены принципы кодирования исходных числовых величин с помощью тетракодов. Разработаны базовые арифметические операции над тетракодами (тетраарифметика). Предложены модифицированные (постбинарные) форматы чисел с плавающей запятой, использующие бинарные коды и тетракоды, а также хранящие в поле формата информацию о типе чисел (число, обыкновенная дробь, интервал) и способе их кодирования (бинарное, постбинарное). Используется разработанный способ округления чисел в постбинарных форматах чисел с плавающей запятой, который позволяет снизить максимальную погрешность при кодировании чисел в два раза.

Ключевые слова: кодо-логический базис, компьютерная логика, компьютерная алгебра, тетралогика, тетракодирование, форматы с плавающей запятой, достоверные вычисления, интервальный анализ, системный анализ.

## ABSTRACT

Ivanitsa S.V. **Justification of laws, arithmetic-logical algorithms and structures of computer information processing systems.** – As a manuscript.

Thesis for the degree of Candidate of Technical Sciences in the specialty 05.13.01 – Systems analysis, management and information processing (by industry) (technical sciences) – DONETSK NATIONAL TECHNICAL UNIVERSITY, Donetsk, 2019.

In the thesis, there are described a theoretical justification and a solution to the scientific and practical problem of postbinary computing concept development when switching to an extended code-logical basis, which made it possible to develop arithmetic-logical foundations to ensure the reliability of the computer calculations.

Tetralogics is proposed as a computer logical basis being the logic of four states that uses the new logical states such as “uncertainty” and “plurality” in addition to the classical states that are “true” and “false”. There are defined principles of initial numerical values coding through tetracodes. Basic arithmetic operations with tetracodes (tetraarithmetic) are developed. Modified (postbinary) floating-point number formats are proposed, using binary codes and tetracodes, as well as storing information on the numbers’ type (number, ordinary fraction, interval) and the method of encoding them (binary, postbinary) in the format field. The established method of rounding numbers in postbinary formats of floating-point numbers is used, allowing to halve the maximum measurement error when encoding numbers.

Keywords: code-logical basis, computer logic, computer algebra, tetralogic, tetracoding, floating-point formats, reliable calculations, interval analysis, system analysis.