

На правах рукописи

Кузьмин Сергей Алексеевич

**Р-АДИЧЕСКИЙ БАЗИС МАТЕМАТИЧЕСКОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ
САПР ОБЪЕКТОВ НАНО- И МИКРОСИСТЕМНОЙ ТЕХНИКИ**

Специальность: 05.13.12 - Системы автоматизации проектирования
(промышленность)

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание учёной степени
кандидата технических наук

Санкт-Петербург - 2011

Работа выполнена на кафедре Систем автоматизированного проектирования Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета "ЛЭТИ" им. В.И. Ульянова (Ленина).

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор
Герасимов Игорь Владимирович

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор кафедры
Автоматизированных систем обработки информации
и управления Санкт-Петербургского
государственного электротехнического университета
"ЛЭТИ" им. В.И. Ульянова (Ленина)
Яковлев Сергей Алексеевич

кандидат технических наук, доцент кафедры
Вычислительных машин, комплексов, систем и сетей
Северо-Западного государственного заочного
технического университета
Анкудинов Иван Георгиевич

Ведущая организация: **ФГУП "НИИ командных приборов"**

Защита диссертации состоится «__» _____ 2011 г. в ____ часов на заседании совета по защите докторских и кандидатских диссертаций Д 212.238.02 Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета "ЛЭТИ" им. В.И. Ульянова (Ленина) по адресу: 197376, Санкт-Петербург, ул. Проф. Попова, 5.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке университета.

Автореферат разослан «__» _____ 2011 г.

Учёный секретарь совета
по защите докторских
и кандидатских диссертаций Д 212.238.02
к.т.н., доцент

Н.М. Сафьянников

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность исследования

Научно-технический прогресс состоит в динамичном эволюционном развитии экономики на основе нововведений, для которых рынок создаёт благоприятные условия. Понятие инновационного цикла является ключевым при рассмотрении любых вопросов ресурсного обеспечения и координации работ по производству новых знаний и их применению в инженерных разработках и перспективных технологиях.

Идея создания ещё несуществующего изделия определяется, как правило, новыми потребностями общества, которым имеющиеся аналогичные изделия не отвечают. Либо как реакция на появление новых возможностей решения проблем народного хозяйства, связанных с научными изысканиями, открытиями и т.п. В обоих случаях происходит формирование технического задания на проектирование. При этом проявляются две основные функции проекта: "коммуникативная" (связывающая заказчика, проектировщика и потребителя) и "объектно-онтологическая" (обеспечивающая внутри процесса проектирования разработку и создание проектируемого изделия).

Существующие технологии практически не поддерживают функции, составляющие суть концептуального этапа проектирования, хотя именно эта стадия жизненного цикла проекта наукоёмкого изделия является наиболее критичной с точки зрения оперативности реакции на запросы рынка и обеспечения качества проекта.

В целом, проблема высококачественного проектирования наукоёмких изделий является весьма актуальной, и только совершенствованием методов управления проектами решена быть не может - необходимо использование прогрессивных технологий, таких как технологии с атомарной точностью (ТАТ), среды виртуальных инструментов (VI-среды), специализированные САПР и т.д.

Отличительной особенностью объектов нано- и микросистемной техники, изготавливаемых по технологиям атомарной точности, (ТАТ-объектов) является их иерархическая структура, свойственная, например, таким физическим системам, как спиновые стёкла, кластеры, наночастицы, большие молекулы и биополимеры. Физика таких систем и структур породила ряд серьёзных теоретических проблем. Оказалось, что иерархическую "конструкцию" неудобно описывать той математикой, которая основана на традиционных представлениях о числах. И это не техническое неудобство. Есть понимание того, что противоречие имеет фундаментальный характер. Здесь нужна новая математика, пригодная для описания неархимедовой геометрии - p -адическая геометрия.

В этой связи возникает актуальная научно-техническая задача обеспечения структурной и функциональной целостности на математическом уровне базиса операций в средах виртуальных инструментов (VI-средах) для систем автоматизированного проектирования объектов, изготавливаемых по технологиям атомарной точности (САПР-ТАТ).

Цель работы и задачи исследования

Цель диссертационной работы - снизить риски, связанные с проблемой выбора адекватного математического аппарата при формулировке проектных задач и проектных решений на концептуальном этапе проектирования ТАТ-объектов и, тем самым, повысить степень успешности разработок конкурентоспособной продукции.

В качестве **объекта исследования** выступает математическое обеспечение сред виртуальных инструментов (VI-сред) САПР для целей создания ТАТ-объектов информатики и вычислительной техники, функционирующих на волновых и квантовых принципах.

Предмет исследования - p -адический базис математического обеспечения VI-сред, ориентированный на создание моделей кластеризации систем инженерных данных с использованием ультраметрических пространств, обладающих несколькими иерархическими уровнями своей семиотической организации и соответствующими характерными масштабами.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие **задачи**:

1. Выявление характерных особенностей ТАТ-объектов, затрудняющих (либо исключающих) использование математических моделей и методов проектирования, успешно применяемых при решении задач автоматизированного проектирования изделий в области микроэлектроники, принципы функционирования которых основаны на использовании закономерностей макроскопической физики.

Данная задача включает в себя исследование моделей кластеризации ТАТ-объектов с использованием концепции ультраметрического пространства с целью определения параметров, представимых числами, удовлетворяющими p -адической норме.

2. Представление параметрической структуры числовых данных в унифицированном виде, обеспечивающем импорт в числовую систему точности выполнения операций, которая бы гарантировалась алгебраически.

3. Конструктивное доказательство существования виртуальной семиотической модели (VS-модели) p -адической числовой системы, представимой в двух формах, одна из которых рассчитана на интерпретацию человеком (визуализация пространства p -адических чисел с привлечением p -адической нормы), а другая - машиной (посредством создания ультраметрической геометрической модели в семиотическом пространстве компьютера).

4. Представление числовых систем (включая p -адические числа) в виде онтологии, как структурной единицы знания для Web-ресурса, обеспечивающего концептуальный этап коллективной работы над проектами ТАТ-объектов.

Методы исследования

Основу исследований составили научные положения о трансдисциплинарности, конвергенции знаний и технологий, взаимной обусловленности и целостности явлений и процессов окружающего мира, общенаучные методологические подходы к изучению

природных явлений, ориентированные на создание искусственных объектов техники и технологий.

В ходе исследования были использованы следующие *методы*:

- *теоретические*:

- неархимедов анализ;
- p -адический анализ;
- модулярная арифметика;
- аналогий и гомологий;
- элементарная топология;

- *эмпирические*:

- обобщение передового опыта в области эволюции компьютерных информационных технологий (КИТ) в автоматизированном проектировании наукоёмких изделий, мотивируемой, прежде всего, борьбой со сложностью.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Методика представления параметрической структуры числовых данных в унифицированном виде, обеспечивающем импорт в числовую систему точности выполнения операций, которая бы гарантировалась алгебраически.

2. Ультраметрические геометрические модели визуализации пространства p -адических чисел с привлечением p -адической нормы.

3. Метод адаптивной виртуализации (VS-моделирования) на концептуальном этапе проектирования ТАТ-объектов.

4. Онтология числовых систем, базирующаяся на концепции абстрагирования при определении математических структур данных.

Новые научные результаты

1. Разработан метод адаптивной виртуализации, предоставляющий возможность выбора и оперативного включения в процесс разработки затребованной теории и модели предметной области.

2. Сформулирована задача унифицированного представления математических структур данных для VI-сред САПР, ориентированных на богатый класс явлений и систем существенно языковой природы.

3. Определена семантика и прагматика свойство-ориентированного языка описания данных с привлечением идей метрического пространства, в котором не выполняется аксиома измеримости Архимеда.

4. Для анализа иерархически структурированных данных предложены специфичным образом сконфигурированные дискретно-непрерывные пространства - так называемые ультраметрические пространства, являющиеся естественной моделью для систем с иерархией.

Степень обоснованности и достоверности полученных научных результатов

Достоверность научных результатов подтверждается корректностью использования математического аппарата, теории комплементарного проектирования, геометрической

алгебры, методов аспектно-ориентированного проектирования и программирования, а также результатами компьютерного моделирования дендритных конструкций в среде виртуальных инструментов.

Теоретическая значимость результатов работы

Проведённый аналитический обзор и компонентный анализ средств автоматизированного инжиниринга, привлекаемых для модельного проектирования наукоёмких изделий, к числу которых относятся объекты нано- и микросистемной техники, показал, что использование моделей и методов концептуального проектирования, успешно применяемых при создании традиционных, не поддерживающих виртуализацию САПР, оказывается малоэффективным (а, порой, и непригодным) при ориентации на технологии атомарной точности. В случае неvirtуализуемых САПР критерием выбора проектных решений является инвариантность семантики порождаемых ими процессов проектирования для любых проектных процедур и математических моделей на стадиях эскизного (концептуального) и технического проектирования. Реализация же в САПР парадигмы виртуализации, с привлечением адекватной предметной области математического аппарата, постулирует многообразие семантик моделей как обрабатываемой информации, так и релевантных методов. Понимание их и однозначное толкование участниками совместной проектной деятельности является предпосылкой успешной работы с виртуальными методами. Это, в свою очередь, требует удовлетворения ряда разнообразных условий и ограничений, совершенствования математических моделей объектов проектирования.

Практическая ценность работы

Применение сред, управляемых разработкой, с использованием р-адических конструкций, позволит повысить степень успешности разработок широкого класса устройств, функционирующих на волновых и квантовых принципах, а также предоставить дружественный интерфейс для систем геометрического моделирования в неархимедовых пространствах.

С прагматической точки зрения, VS-модель является генератором предсказаний свойств классов искусственно создаваемых предметов, без строгих "правил игры", опираясь на известные экспериментальные и теоретические факты, используя основанные на интуиции догадки, которые в дальнейшем будут воплощены в реальное высокотехнологичное изделие.

Практическим результатом работы является подсистема САПР средств аналитического приборостроения с привлечением концепции автоформализации знаний.

Реализация и внедрение результатов работы

Теоретические и практические результаты работы использовались в ряде госбюджетных научно-исследовательских работ, проводимых по тематическому плану СПбГЭТУ «ЛЭТИ» в 2009-2011 гг.:

- по теме «Разработка теоретических основ модельного проектирования на основе парадигмы виртуальности» (шифр: САПР-45, 2009-2010 гг.);

– по теме «Исследование и разработка математических основ построения итеративных дифференциальных анализаторов» (шифр: САПР-48, 2011 г.);
а также в НИОКР, проводимой ООО «ПОЛИТЕСТ» по теме «Разработка портативного высокочувствительного масс-спектрометрического течеискателя и его мелкосерийное производство» (Государственный контракт № 7795p/11298 от 17.04.2010 г.), в результате выполнения которого соискателем в соавторстве было разработано изобретение «Узел регистрации ионного тока в масс-спектрометрическом течеискателе» (Заявка на патент №2010116117/28 (022945) от 19.04.2010 г.).

Результаты исследований были использованы при подготовке проекта «Многоканальный рентгеновский анализатор в системе управления экологической безопасностью: интеллектуальный анализ данных» (в соавторстве) на конкурс инновационных проектов молодых учёных, аспирантов и студентов СПбГЭТУ «ЛЭТИ» 2011 года, за который соискателем был получен диплом «За активное участие в инновационной деятельности вуза».

По тематике работы автором было получено Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2011611104 «Визуализатор решения задачи о Ханойской башне с помощью кодов Грея (Hanoi-Gray)» (зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ 02.02.2011 г.).

Апробация работы

Основные положения диссертационной работы докладывались и обсуждались на:

- Научно-техническом семинаре «Информационные технологии инжиниринга» кафедры САПР СПбГЭТУ «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина) совместно с ЦИТП РАН (г. Москва) (2008-2009 гг.);
- 61-ой научно-технической конференции профессорско-преподавательского состава СПбГЭТУ «ЛЭТИ» (04.02.2008 г.);
- Научно-технической конференции молодых специалистов «Электронные и электромеханические системы и устройства» (г. Томск, 10.04.2008 г.);
- XI Международной конференции по мягким вычислениям и измерениям «SCM'2008» (г. Санкт-Петербург, 23.06.2008 г.);
- 62-ой научно-технической конференции профессорско-преподавательского состава СПбГЭТУ «ЛЭТИ» (2009 г.);
- Всероссийской конференции с элементами научной школы для молодёжи «Проведение научных исследований в области обработки, хранения, передачи и защиты информации» (г. Ульяновск, 01-05.12.2009 г.);
- 63-ей научно-технической конференции профессорско-преподавательского состава СПбГЭТУ «ЛЭТИ» (2010 г.);
- Первой международной научно-практической конференции «Высокие технологии, фундаментальные и прикладные исследования в физиологии и медицине» (PhysioMedi) (г. Санкт-Петербург, 23-26.11.2010 г.);

- 64ой научно-технической конференции профессорско-преподавательского состава СПбГЭТУ «ЛЭТИ» (2010 г.).

Публикации

По материалам диссертации опубликовано 8 печатных работ, из них - 2 статьи в ведущих рецензируемых изданиях, рекомендованных в действующем перечне ВАК; 1 монография (в соавторстве); 2 статьи, опубликованные в сборниках научно-технических трудов и 3 работы в материалах научно-технических конференций (всероссийских и международных).

По результатам исследований и разработок автором получено 1 свидетельство о регистрации программы для ЭВМ, а также подана 1 заявка на изобретение (уже получившая положительный результат формальной экспертизы).

Список публикаций, а также сведения о свидетельствах и заявках на патенты перечислены в конце автореферата.

Структура и объём диссертации

Диссертация состоит из введения, четырёх глав, заключения, списка литературы из 65 наименований, а также 3-х приложений. Объём основного содержания работы составляет 129 страниц. Работа включает 36 рисунков.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во *введении* обосновывается актуальность темы диссертации, определяются цели и задачи исследования, а также объект и предмет исследования. Формулируются основные положения, выносимые на защиту. Дается краткая характеристика новизны полученных результатов, их достоверности и практической ценности.

В *первой главе* рассматривается проблема переориентации в развитии систем автоматизированного исследовательского проектирования (САИПР) на новые принципы и подходы при определении базовой основы и технологий проектирования наукоёмких объектов. Дается характеристика в общем виде задачи представления пространства объектов предметной области САПР с использованием информационных технологий виртуализации.

Основное внимание также уделено исследованию моделей кластеризации ТАТ-объектов с использованием концепции ультраметрического пространства и р-адической нормы. Рассматриваются:

- модели кластеризации иерархических термодинамических систем;
- модели кластеризации дендримеров.

В качестве примера рассмотрим модель кластеризации сильно неравновесной иерархической термодинамической системы типа спиновых или структурных стёкол¹. Такие системы представляют собой суперансамбли, состоящие из иерархически

¹ А.И. Олемской, А.Я. Флат Использование концепции фрактала в физике конденсированной среды // Успехи физических наук. Том 163, № 12. - Москва, 1993.

соподчинённых статистических ансамблей, которые, в свою очередь, состоят из набора подансамблей и т.д. В данной термодинамической системе происходит процесс обмена свободной энергией между ансамблями. Ансамбли располагаются на различных уровнях иерархии. Каждому уровню соответствует свой уровень потенциальной энергии (рис. 1).

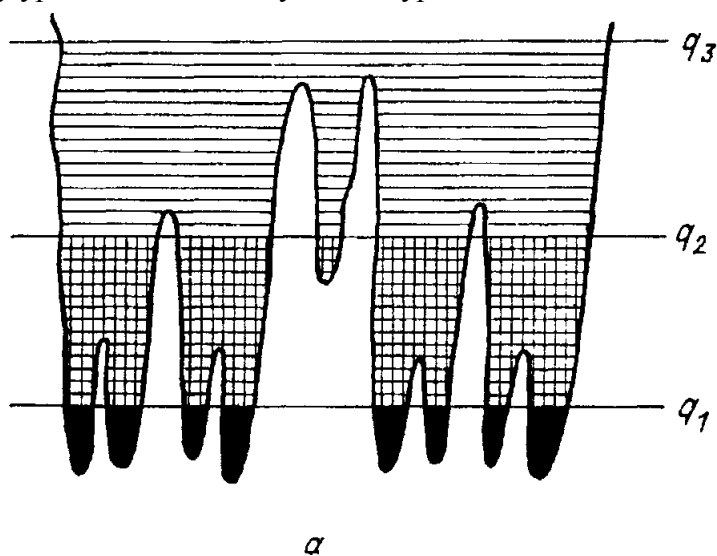


Рис. 1. Рельеф иерархической термодинамической системы
(q_n - потенциальная энергия, накапливаемая на разных уровнях системы)

Между ансамблями расположены барьеры, препятствующие свободному обмену энергией. Чтобы обмен состоялся, участники процесса должны "преодолеть" барьер по высоте. Значение высоты барьера между участниками обмена соответствует разнице уровней иерархии, на которых они расположены.

В иерархической системе сначала протекают наиболее быстрые процессы обмена энергией, отвечающие преодолению барьеров минимальной высоты. При этом, происходит слияние наименьших статистических ансамблей, и система переходит на более высокий иерархический уровень. Затем преодолеваются барьеры большей высоты, в результате чего получившиеся суперкластеры сливаются в более крупные образования, отвечающие следующему иерархическому уровню. Далее этот процесс может продолжаться неограниченно.

Фрактальный характер иерархически соподчинённой системы проявляется в координатной зависимости $U(r)$ потенциальной энергии системы на разных уровнях иерархии (рис. 2а). Для визуализации иерархической структуры фрактала, в примере используется дерево Кейли (рис. 2б). Листья дерева соответствуют ансамблям, находящимся на нижнем уровне иерархии. При слиянии ансамблей нижнего уровня, возникает кластер, находящийся на более верхнем уровне иерархии системы. Ему соответствует узел дерева Кейли, который объединяет соответствующие листья нижнего уровня. При слиянии кластеров одного уровня, образуется суперкластер, находящийся на уровень выше. Ему также соответствует узел дерева Кейли, объединяющий

соответствующие подузлы. И так далее. Соответствие уровней иерархии термодинамической системы уровням иерархии дерева Кейли изображено на рис. 2.

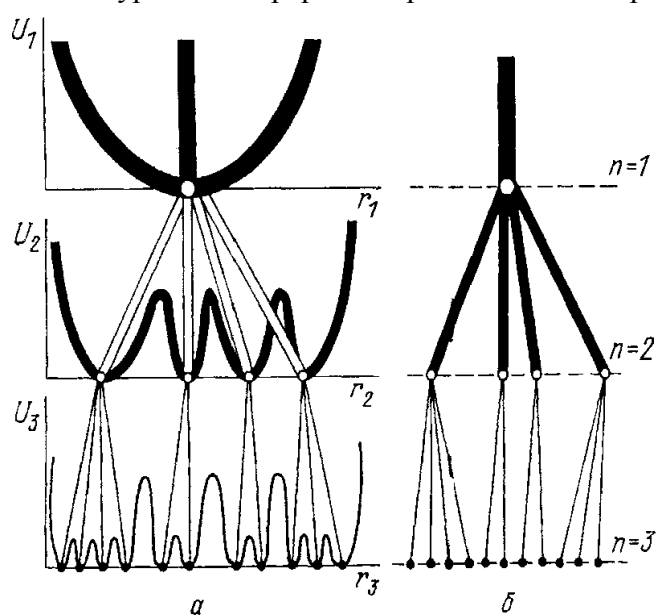


Рис. 2. Соответствие графика зависимости потенциальной энергии объектов системы от их координаты на дереве Кейли

(U_n - потенциальная энергия уровня, r_n - расстояние между ансамблями на соответствующем уровне, n - номер уровня на дереве Кейли)

Поскольку ансамбли отвечают узлам дерева Кейли, то им можно сопоставить точки ультраметрического пространства, разделяемые расстоянием между ними. Таким образом. Высоты барьеров, a , вместе с ними, и времена обмена энергиями оказываются функциями расстояния в ультраметрическом пространстве состояний.

В начале **второй главы** приводится теоретический обзор общеизвестных понятий в области ультраметрического пространства, модулярной арифметики и p -адических чисел.

Дальнейшее содержание главы посвящено описанию методики представления параметрической структуры числовых данных в унифицированном виде.

В частности, приводятся алгоритмы:

- p -адического представления натурального числа;
- p -адического представления рационального числа;
- p -адического представления отрицательных чисел.

Приводится нотация p -адической арифметики и устанавливается её связь с нотацией p -ичной системы счисления (например, двоичной).

В качестве примера рассмотрим алгоритм получения p -адического представления натурального числа.

Целое p -адическое число² x для произвольного простого p представляет собой последовательность $x = x_1, x_2, \dots, x_j, x_{j+1}, \dots$ вычетов x_j по модулю p^j , удовлетворяющую условию:

$$x_j \equiv x_{j+1} \pmod{p^j} . \quad (1)$$

Положительные целые p -адические числа имеют ограниченную по длине последовательность вычетов. Отрицательные и многие числа, отличные от целых, представляются бесконечной по длине последовательностью.

Беря в качестве элемента класса вычетов число x_j такое, что $0 \leq x_j \leq p^j$, мы можем записать каждое целое p -адическое число в виде $x = x_1 x_2 \dots x_j \dots$ однозначным образом. В свою очередь, записывая каждое x_j в p -ичной системе счисления $x_j = a_n \dots a_2 a_1$ и учитывая условие (1), мы можем всякое p -адическое число в каноническом виде представить в p -ичной форме записи $x = a_0, a_1 a_0, a_2 a_1 a_0, \dots$, или в традиционном (начиная со старших разрядов) виде $x = a_{n-1} \dots a_1 a_0$.

По аналогии с записью вещественных чисел, для записи p -адических чисел вводится разделительная точка (так называемая p -адическая точка), как средство задания знака показателя степени p в разложении числа в степенной ряд:

$$a_n a_{n+1} \dots a_{-2} a_{-1} \cdot a_0 a_1 \dots \quad \text{для } n < 0;$$

$$\cdot a_n a_{n+1} \dots \quad \text{для } n = 0;$$

$$\cdot 00 a_n a_{n+1} \dots \quad \text{для } n > 0.$$

Такой вид записи называется *каноническим*.

Для неотрицательного числа x его p -адическое представление $x = \sum_{j=0}^{dx} a_j \cdot p^j$, где

$a_j \in 0, p-1$ и $dx \geq 0$ можно получить, используя, например, следующий алгоритм:

Дано: натуральное целое число x , простое число p .

Надо: последовательность a_j p -адических цифр.

Начало

$$j := 0$$

цикл пока $x > 0$

$$a_j := x \bmod p \quad \text{— функция вычисления вычета числа } x \text{ по модулю } p$$

$$x := x / p \quad \text{— функция вычисления целой части результата деления } x \text{ на } p$$

$$j := j + 1$$

² Кузьмин С.А. p -Адический базис математического обеспечения САПР объектов микро- и наносистемной техники // Известия СПбГЭТУ «ЛЭТИ». Серия «Информатика, управление и компьютерные технологии». Вып. 5. - СПб.: Издательство СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2010. - С. 36-42.

конец цикла

$$dx := j - 1$$

Конец

Рассмотрим пример. Нам необходимо представить целое положительное число $x = 241$ в 5-адическом базисе ($p=5$). Выполняя алгоритм по шагам, мы каждый раз будем фиксировать получаемые значения a_j p -адических цифр в разрядную сетку, начиная с младшего разряда:

				5^0				
			...	a_0	$x_1 \equiv 241 \pmod{5} = 1 = a_0 \cdot 5^0;$			
				5^1				
			...	a_1	a_0	$x_2 \equiv 241 \pmod{5^2} = 16 = a_0 \cdot 5^0 + a_1 \cdot 5^1;$		
				5^2				
			...	a_2	a_1	a_0	$x_3 \equiv 241 \pmod{5^3} = 116 = a_0 \cdot 5^0 + a_1 \cdot 5^1 + a_2 \cdot 5^2;$	
				5^3				
3			...	a_3	a_2	a_1	a_0	$x_4 \equiv 241 \pmod{5^4} = 241 = a_0 \cdot 5^0 + a_1 \cdot 5^1 + a_2 \cdot 5^2 + a_3 \cdot 5^3;$

$a_0 = 1;$
 $a_0 = 1, a_1 = 3;$
 $a_0 = 1, a_1 = 3, a_2 = 4;$
 $a_0 = 1, a_1 = 3, a_2 = 4, a_3 = 1.$

$$x_2 = a_1 a_0 \Rightarrow 3 \cdot 5^1 + 1 \cdot 5^0 = 16, a_1 = 3, a_0 = 1;$$

$$x_3 = a_2 a_1 a_0 \Rightarrow 4 \cdot 5^2 + 3 \cdot 5^1 + 1 \cdot 5^0 = 116, a_2 = 4, a_1 = 3, a_0 = 1;$$

$$x_4 = a_3 a_2 a_1 a_0 \Rightarrow 1 \cdot 5^3 + 4 \cdot 5^2 + 3 \cdot 5^1 + 1 \cdot 5^0 = 241, a_3 = 1, a_2 = 4, a_1 = 3, a_0 = 1.$$

Видно, что условие (1) выполняется для всех $j = 1, 2, 3, 4$. Так, $x_2 \equiv x_3 \pmod{5^2}$,

поскольку $x_3 - x_2 = 4 \cdot 5^2$ и $x_3 - x_2 \pmod{5^2} = 0$.

Нетрудно заметить, что 5-адическая и 5-ичная формы записи рассматриваемого в качестве примера положительного целого числа $x = 241$ совпадают с точностью до порядка слагаемых в частичных суммах степенного ряда (последовательности Коши) $x = a_0 \cdot 5^0 + a_1 \cdot 5^1 + a_2 \cdot 5^2 + a_3 \cdot 5^3$, где $a_k \in 0, 4$; $k = 0, 1, 2, 3$. Однако, в 5-адической записи a_k записываются, начиная с младших разрядов, а в 5-ичной a_k традиционно записываются, начиная со старших разрядов $x = a_3 \cdot 5^3 + a_2 \cdot 5^2 + a_1 \cdot 5^1 + a_0 \cdot 5^0$.

В заключительной части главы приведены модели визуализации пространства p -адических чисел посредством фракталов:

- классического дерева Кейли;
- дерева Брюа-Титса;
- дерева Кейли с прямоугольным расположением веток;
- треугольника Серпинского.

Следуя введённому примеру из первой главы, будем визуализировать p -адические числа с помощью иерархического дерева Кейли (для случая $p=2$).

Построения ведутся от корня дерева. Ему соответствует уровень с номером "0". Из корня отходят 2 ветки, расположенные симметрично друг относительно друга. Будем обозначать левую ветку буквой "0", а правую ветку буквой "1". Полученные узлы дерева будут находиться на новом уровне дерева Кейли с номером "1" (рис. 3).

Дальнейшие построения продолжаются симметрично по каждому из образованных на предыдущем шаге узлов - каждый из них становится "родительским" узлом для новых двух веток дерева Кейли. Согласно схеме именования, введённой на предыдущем шаге, все левые ветки дерева Кейли будут обозначаться буквой "0", все правые ветки - буквой "1". Введённый, таким образом, новый уровень иерархии дерева Кейли будет иметь следующий порядковый номер - "2" (рис. 3).

Построение дерева далее продолжается по-анalogии (рис. 3).

Теперь попытаемся расставить на концах дерева двухбуквенные слова. Для этого вводится понятие *пути*. Под путём в дереве Кейли мы будем понимать последовательность веток дерева Кейли, идущую от его корня к выбранному листу (или узлу). Чтобы записать слова, закреплённые за листьями дерева Кейли, применяется следующий механизм:

- 1) выбирается конкретный лист дерева, за которым нужно закрепить слово;
- 2) устанавливается путь от корня дерева Кейли до этого слова;
- 3) начинается движение по выбранному пути (от корня к листу дерева);
- 4) параллельно с этим, начинает формироваться само двухбуквенное слово (начиная с младшего разряда);
- 5) при прохождении очередной ветки в пути дерева, считывается буква, именуемая эту ветку. И именно она записывается в текущий разряд слова.

Таким образом, по мере прохождения пути в дереве Кейли, слова заполняются от младших разрядов к старшим (рис. 3).

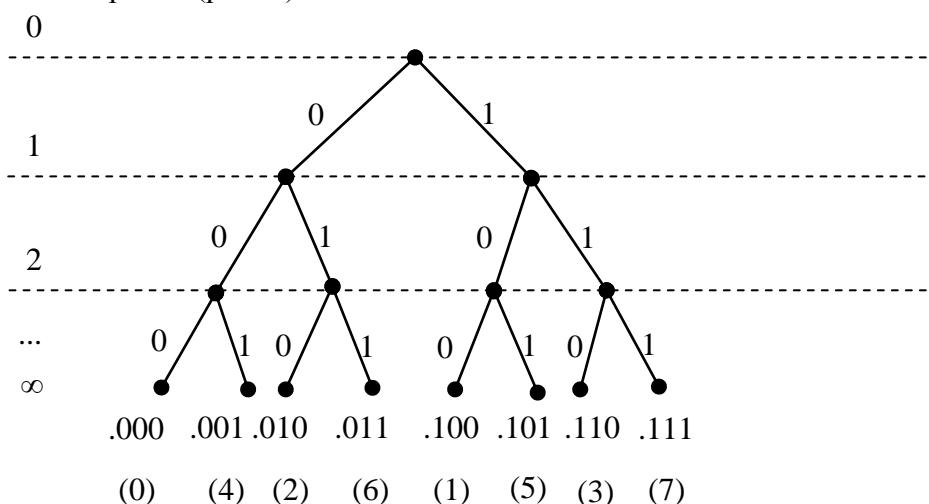


Рис. 3. Расположение целых положительных чисел на бинарном дереве Кейли

Если сопоставить записанным, таким образом, двухбуквенным словам соответствующие им целые положительные числа (рис. 3), то мы увидим, что расположение их друг относительно друга будет соответствовать *p*-адической норме ($|x|_p = p^{-n}$, если $a_n \neq 0$): числа, которые лучше других делятся на число 2 без остатка, будут располагаться ближе к 0. В частности, чётные числа будут располагаться по левую сторону дерева Кейли, а нечётные - по правую.

При этом, чтобы определить расстояние между двумя числами на дереве Кейли, необходимо применить следующий алгоритм:

- 1) определяются листья дерева, соответствующие выбранным числам;
- 2) определяются пути от корня дерева до этих листьев;
- 3) сравнивая пути между собой, устанавливается общая часть пути и узел расхождения путей;
- 4) устанавливается номер уровня, на котором расположен данный узел (число n);
- 5) расстояние между числами будет равно *p*-адической норме их разности и будет определяться как p^{-n} .

Чтобы проверить работу данного алгоритма, рассмотрим пример определения расстояния между числами 2 и 4 на дереве Кейли:

- числу 2 соответствует слово ".010", числу 4 - слово ".001";
- пути к этим словам на дереве Кейли имеют одну общую ветку, узел расхождения находится на уровне с номером "1";
- определяя расстояние между числами по формуле p^{-n} , получаем значение $\frac{1}{2}$;
- проверка осуществляется по формуле *p*-адической нормы: $|2 - 4|_2 = |4 - 2|_2 = |2|_2 = \frac{1}{2}$ - верно!

В *третьей главе* рассматривается концепция абстрагирования при определении математических структур данных и устанавливается её роль в концептуальном моделировании предметной области.

В качестве практической части приводится небольшая онтология числовых систем (включая *p*-адические числа), разработанная в среде Protégé³ (рис. 4). В основу разработки онтологии легли известные соотношения между числовыми системами.

"Natural" - натуральные числа. "Zero" - 0. "Negative" - отрицательные числа. "Integer" - целые числа. "Fractional" - дроби. "Rational" - рациональные числа. "Irrational" - иррациональные числа. "Real" - вещественные числа. "PAdic" - *p*-адические числа. "Imaginary" - мнимая единица. "Complex" - комплексные числа.

Как видно из графа, большинство понятий связаны между собой отношением расширения ("extend").

³ Герасимов И.В., Майга А.И., Лозовой Л.Н. Онтологический инжиниринг. Средства и спецификации онтологического моделирования: Учебное пособие. - СПб.: Издательство СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2009. 232 с.

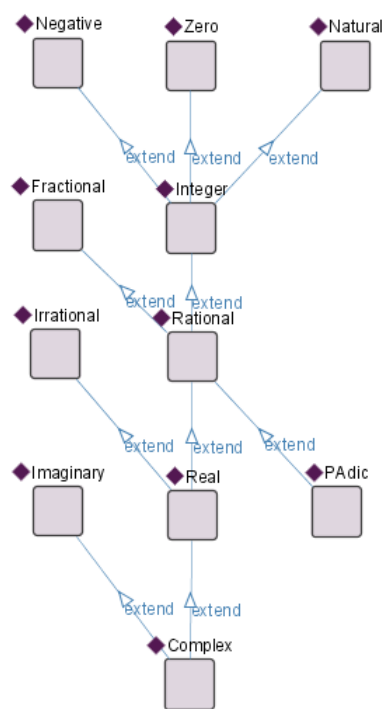


Рис 4. Граф отношений между числовыми системами, разработанный в среде Protégé

В *четвёртой главе* рассматривается метод адаптивной виртуализации (VS-моделирования). При разработке этого метода исходным положением было утверждение: к настоящему времени прогресс в развитии методологии проектирования объектов техники и технологий достиг этапа, когда стала проявляться ограниченность традиционного рассмотрения проекта в условиях, заведомо известных.

В поле зрения специалистов в области САПР входят так называемые среды, управляемые разработкой (СУР) - инструментальные среды уровня middleware⁴. Предлагается реализация среды исполнения посредством формирования для каждого конкретного проектируемого изделия (артефакта) и, более того, для различных этапов его проектирования, отдельного модуля (DDF - Design Driven Framework). DDF воспринимает иерархическое описание объекта проектирования на свойство-ориентированных языках функциональных спецификаций, которые рассматриваются как частный случай применения онтологического инжиниринга⁵. С понятием VS-модели сопоставляется "двухслойная" онтологическая структура - в ней выделяется актуальное и потенциальное содержание⁶. На концептуальном этапе проектирования ТАТ-объектов, возникает возможность выбора и оперативного (интерактивного) включения в процесс разработки

⁴ Герасимов И.В., Кузьмин С.А., Лозовой Л.Н., Никитин А.В. Основания технологии комплементарного проектирования наукоёмких изделий: Монография / под редакцией И.В. Герасимова и А.В. Никитина. - СПб.: Издательство СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2010.

⁵ См. 4.

⁶ Герасимов И. В., Калмычков В. А., Лозовой Л. Н. Комплементарное моделирование в средах САПР: виртуализация квантовых объектов информации. СПб.: Техномедиа, 2007. 208 с.

затребованной теории и модели предметной области. Так что любой из затребованных интеллектуальных ресурсов позволяет любому из участников совместной проектной деятельности выполнить интерпретацию теории в модель. Тем самым, с привлечением идей вычислительного интеллекта и когнитивных принципов принятия решений, воплощается проектное решение в диалектической триаде «Символ - Понимание - Слово».

«Символ» несёт в себе отвлечённый смысл, как таковой. Он представляет собой исчерпывающую совокупность значимых сущностей предметной области, является внешне-внутренней репрезентацией их интенционала, представляет систему отношений, способных передать вовне на базе своих изобразительных средств все характерные внутренние признаки ТАТ-объекта.

«Понимание» отражает существенный смысл, устанавливает, какие функции компонентов области интерпретации представляются важными, выявляет существенно значимые отношения между компонентами области интерпретации и, следовательно, между соответствующими модулями DDF.

«Слово» выступает потенциальной основой коммуникации. В нём представлен выразительный смысл, наделённый определённой активностью. Процесс понимания оформляет смысл в понятие и завершается словом. Синтаксическое оформление значимых отношений завершает процедуру построения концептуальной модели DDF. В свою очередь, каждая типовая функция может быть разложена по базису более низкого иерархического уровня. Таким образом, формируется иерархическая структура соподчинённых типовых компонентов (модулей) функциональной модели DDF.

Из диалектической триады «Символ - Понимание - Слово» возникает семиотическое пространство компьютера, в котором воспроизводятся согласованные между участниками совместной деятельности проектные решения.

На основании обобщения и конкретизации теоретических идей комплементарного проектирования наукоёмких изделий, показано, что среда, управляемая разработкой (DDF), представлена конечным множеством моделей, каждая из которых отражает определённую грань её сущности. При этом, свойства системы рассматриваются как некоторый атрибут объекта исследования в сфере инструментальных сред, обеспечивающих конвергенцию среды проектирования и вычислительной среды при реализации сквозного маршрута автоматизированного проектирования с возможностью дальнейшей настройки и адаптации, удовлетворения требованиям адекватного математического формализма для моделирования ТАТ-объектов.

В *заключении* сформулированы основные научные и практические результаты диссертационной работы, приводятся рекомендации по дальнейшим исследованиям.

В *приложениях* приводятся коды 2-х программ, разработанных по теме исследований: Визуализатор решения задачи о Ханойской башне с помощью кодов Грея и

Программа для определения рационального числа и, соответствующей ему, дроби Фарея по коду Гензеля.

Также в качестве приложений представлены 2 акта о внедрении результатов диссертационной работы.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

К наиболее весомым научным результатам следует отнести:

- **для теории автоматизированного проектирования:**
 - метод адаптивной виртуализации (VS-моделирования), используемый на концептуальном этапе проектирования ТАТ-объектов и для создания интерактивных систем фрактального геометрического моделирования в р-адическом базисе;
- **для практики проектирования:**
 - методика представления параметрической структуры числовых данных в унифицированном виде, обеспечивающем импорт в числовую систему точности выполнения операций, которая бы гарантировалась алгебраически;
 - инструментальные средства визуализации дендритных объектов и иерархически организованных многокомпонентных систем;
- **для образовательного процесса:**
 - развитие программ подготовки магистров по направлению «Информатика и вычислительная техника» в части, касающейся освоения методов, моделей и инструментальных средств интерактивных систем фрактального геометрического моделирования в контексте изучения и внедрения CALS-технологий, а также сетевых информационных технологий в проектировании наукоёмкой продукции с привлечением онтологии числовых систем.

ПУБЛИКАЦИИ

Основные результаты диссертации опубликованы в следующих работах:

Публикации в изданиях, рекомендованных ВАК России:

1. Кузьмин С.А. р-Адический базис математического обеспечения САПР объектов микро- и наносистемной техники // Известия СПбГЭТУ «ЛЭТИ». Серия «Информатика, управление и компьютерные технологии». Вып. 5. - СПб.: Издательство СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2010. - С. 36-42.
2. Кузьмин С.А. Компьютерные информационные технологии в контексте автоматизации проектирования изделий электроники / И.В. Герасимов, С.А. Кузьмин, Л.Н. Лозовой, А.В. Никитин // Известия СПбГЭТУ «ЛЭТИ». Серия «Информатика, управление и компьютерные технологии». - СПб.: Издательство СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2010. - Вып. 9. - С. 39-46.

Монографии (в соавторстве):

3. Герасимов И.В., Кузьмин С.А., Лозовой Л.Н., Никитин А.В. Основания технологии комплементарного проектирования наукоёмких изделий: Монография / под редакцией И.В. Герасимова и А.В. Никитина. - СПб.: Издательство СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2010. - 206 с.

Другие статьи и материалы конференций:

4. Кузьмин С.А. Визуализация ультраметрических пространств, р-адические числа и абстрактный тип данных / И.В. Герасимов, С.А. Кузьмин, Л.Н. Лозовой // Сборник докладов XI Международной конференции по мягким вычислениям и измерениям «SCM'2008». В 2-х томах. Том 1. - СПб.: Издательство СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2008. - С. 79-82.
5. Кузьмин С.А. Концептуальные основания комплементарного проектирования наукоёмких объектов техники и технологии / И.В. Герасимов, С.А. Кузьмин, А.В. Никитин, Д. Ндайонгеже // Всероссийская конференция с элементами научной школы для молодёжи «Проведение научных исследований в области обработки, хранения, передачи и защиты информации». Сборник научных трудов. В 4-х томах. Том 3. - Ульяновск: Издательство УлГТУ, 2009. - С. 9-16.
6. Кузьмин С.А. Трансдисциплинарный системный подход в исследовании феномена целого витасистем / И.В. Герасимов, Н.М. Сафьянников, А.И. Каримов, Т.И. Каримов, С.А. Кузьмин // Сборник трудов Первой международной научно-практической конференции «Высокие технологии, фундаментальные и прикладные исследования в физиологии и медицине». Том 2. - СПб.: Издательство Политехнического университета, 2010. - С. 22-28.
7. Кузьмин С.А. Рентгеновский анализатор содержания лёгких элементов Mg, Al, P, S, K и Ca в жидких образцах / С.А. Кузьмин, Л.Н. Лозовой, И.В. Матвеева, С.М. Сергеев // Сборник «Неразрушающий контроль и диагностика окружающей среды, материалов и промышленных изделий». Вып. 49. - СПб.: Издательство СЗТУ, 2009.
8. Кузьмин С.А. Многоканальный рентгеновский анализатор «СПЕКТР-МК» / С.А. Кузьмин, Л.Н. Лозовой, А.И. Майга, И.В. Матвеева, Д. Ндайонгеже, С.М. Сергеев // Сборник «Неразрушающий контроль и диагностика окружающей среды, материалов и промышленных изделий». Вып. 49. - СПб.: Издательство СЗТУ, 2009.

Свидетельства:

9. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2011611104, Федеральная служба по интеллектуальной собственности, патентам и знакам / Кузьмин С.А. Визуализатор решения задачи о Ханойской башне с помощью кодов Грея (Hanoi-Gray). Заявка № 2010617707, дата поступления: 07.12.2010 г., зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ: 02.02.2011 г.

Соискатель

Кузьмин С.А.

