

На правах рукописи

Матвеева Ирина Витальевна

ЛИНГВИСТИЧЕСКОЕ И ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ
АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ УСТРОЙСТВ,
ФУНКЦИОНИРУЮЩИХ НА ВОЛНОВЫХ И КВАНТОВЫХ
ПРИНЦИПАХ

Специальность: 05. 13. 12 – Системы автоматизации проектирования
(промышленность)

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Санкт-Петербург – 2011

Работа выполнена в Санкт–Петербургском государственном электротехническом университете “ЛЭТИ” им. В.И. Ульянова (Ленина)

Научный руководитель –
доктор технических наук, профессор Герасимов Игорь Владимирович

Официальные оппоненты:

доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой Информатики и прикладной математики Санкт-Петербургского национального исследовательского университета информационных технологий, механики и оптики

Немолочнов Олег Фомич

кандидат технических наук, доцент кафедры «Подъемно-транспортные, путевые и строительные машины» Петербургского государственного университета путей сообщения

Быков Владислав Павлович

Ведущая организация – Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения (ГУАП)

Защита диссертации состоится «20» декабря 2011 г. в 16.30 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, г. Санкт-Петербург, ул. Проф. Попова, д. 5.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке университета.

Автореферат разослан « 18 » ноября 2011 г.

Ученый секретарь совета
по защите докторских
и кандидатских диссертаций Д.212.238.02

Н. М. Сафьянников

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность исследования. В основу современных компьютерных технологий положены достижения не только в базовых областях – электротехника и информатика, но и исследования и разработки из принципиально новых разделов науки – квантовая физика, нанотехнологии, биомедицинское проектирование и т.д.

Проблематика организации волновых вычислений в системах малой размерности (квантовых) является составной частью фундаментальных исследований в рамках Приоритетных направлений развития науки, технологий и техники в Российской Федерации¹ – «Индустрия наносистем» и критических технологий федерального уровня – «Нано-, био-, информационные, когнитивные технологии».

Сложность проектирования вычислительных устройств на наноуровне требует средств разработки адекватных исследуемым проблемам, что ведет за собой необходимость расширения и изменение направленности традиционных областей применения систем автоматизированного проектирования (САПР). Возникает модель вычислений, принципиально отличная от традиционной, основанная на суперпозиции состояний кубитов, требующая адекватного математического формализма.

Современные квантовые технологии ведут к полностью новым проблемам для разработчиков САПР, которые должны быть решены при создании практического квантового устройства, в частности:

- разработка среды проектирования квантовых устройств в настоящее время является трудной задачей в первую очередь из-за сложности описаний объектов на языке квантовой теории, а также ввиду ограниченного числа известных квантовых алгоритмов,
- точный состав модулей среды проектирования квантовых устройств не определен,
- модель программирования также является неопределенной, поскольку существуют разные предложения организации квантового компьютера, например как приложение или процессор общего назначения,
- разработка практических алгоритмов синтеза для квантовой цепи является чрезвычайно сложной из-за быстрого роста размеров данных и отсутствия стандартных методов синтеза, а так же инструментов их поддерживающих,
- так же не решен вопрос масштабируемости квантовых вычислений.

На сегодняшний день не существует инструментов, позволяющих проектировать масштабируемые квантовые цепи с учетом ограничений физической реализуемости – в ЛБС²-нотации.

По оценкам специалистов рабочие прототипы квантовых компьютеров будут созданы через десять лет, но многие интересные решения возникают уже сейчас, например, в криптографии, при управлении роботами, в системах навигации для сверхточных часов и т.д. Существуют прототипы конкретных элементов квантового компьютера, но это все системы с малым числом кубитов. Первостепенными задачами являются разработка квантовых алгоритмов и масштабируемость. При решении этих задач ключевую роль иг-

¹ Указ Президента РФ от 07.07.2011 N 899

² ЛБС – линейно ближайшее соседство кубитов преобразователя, ограничение взаимодействия кубитов

рает синтез квантовых цепей.

Адекватно решить многоплановую задачу построения устройств, работающих на квантовых принципах, в будущем можно будет на основе создания интегрированной системы автоматизированного проектирования VI-среды³ САПР квантовых устройств. В настоящее время алгоритмы выполнения отдельных этапов проектирования квантовых цепей уже достаточно хорошо формализованы, поэтому в рамках восходящего подхода к проектированию актуальной является разработка VI-среды проектных решений для квантовых цепей, исследованию и разработке подсистем которой и посвящена настоящая диссертация.

Диссертационная работа выполнена в рамках научных исследований VI-сред САПР в соответствии с планами факультета компьютерных технологий и информатики (ФКТИ) по реализации инновационной научно-образовательной программы «Информатика, управление и компьютерные технологии»: раздел 3 «Обработка информации в наносистемах» (проект «Разработка информационного базиса для элементов квантового компьютеринга»).

Цели и задачи исследования

Цель работы – Автоматизация проектирования многоуровневых спецификаций квантовых цепей и верификация их реализаций в рамках подсистемы VI-среды САПР устройств, функционирующих на волновых и квантовых принципах. Достижение поставленной цели позволит повысить степень успешности разработок большого класса квантовых устройств в VI-среде САПР за счет выгод от использования формальных языков проектных спецификаций на концептуальном уровне проектирования.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

1. Исследование существующих решений в области проектирования квантовых вычислений и анализ перечня проектных процедур, необходимых для проектирования устройств, функционирующих на волновых и квантовых принципах в нотации квантовых цепей с учетом нанотехнологических ограничений.
2. Разработка программного обеспечения, алгоритмов и методик компиляции, минимизации, анализа и имитационного моделирования квантовых цепей с учетом ограничений физической реализуемости (в ЛБС-нотации).
3. Разработка формализованных спецификаций для описания на концептуальном уровне квантовых цепей с возможностью пространственного масштабирования.
4. Исследование интероперабельности комплекса разработанных программных модулей с существующими программными средами симуляции квантовых вычислений.

Основные методы исследования

Для решения поставленных задач в диссертационной работе используются методы математического аппарата квантовой физики, алгебры полиномов Рида-Маллера (ПРМ), теории клеточных автоматов, линейной алгебры, положения теории построения САПР, методы объектно-ориентированного проектирования и программирования.

³ VI – Virtual Instrumentation

Достоверность научных результатов

Подтверждается корректностью использования математического аппарата, теории клеточных автоматов, алгебры полиномов Рида-Маллера, теории обработки сигналов, линейной алгебры, методов объектно-ориентированного проектирования и программирования, а так же результатами тестирования в среде реконфигурируемого модульного клеточного автомата и совместимости с внешними средами проектирования (симуляторами) на уровне формата описания – обмен проектными данными в формате STEP (язык описания – XML).

Новые научные результаты

Научная новизна полученных в диссертационной работе результатов заключается в следующем:

1. Разработана новая архитектура подсистемы VI-среды САПР проектных решений для квантовых цепей, основанная на новой методике проектирования многоуровневой спецификации для класса C^mNOT масштабируемых квантовых логических цепей с учетом ограничений физической реализуемости.
2. Предложены новые алгоритмы проектирования (формирования) многоуровневых спецификаций C^mNOT и SC^mNOT классов квантовых логических цепей: алгоритм генерации масштабированной квантовой цепи на основе алгебры полиномов Рида-Маллера; алгоритм преобразования к ЛБС-нотации квантовых логических цепей и алгоритм лексического анализа для проверки корректности выполнения трассировки квантовых цепей.
3. Предложен усовершенствованный алгоритм рекурсивно-лексического обобщения унифицированного квантового Фурье-преобразования на основе новой схемы перестановки коэффициентов с использованием преобразователей C^mNOT , а также единая спецификация для квантового унифицированного управляемого Фурье-преобразователя.
4. Предложена новая методика оценки квантовых цепей по различным критериям, разработаны новые правила минимизации квантовых цепей с учетом нанотехнологических ограничений, а также шаблоны для минимизации.
5. Впервые предложен реконфигурируемый кластерный клеточный автомат (РККА) для имитационного моделирования проектных решений.

Научные положения, выносимые на защиту

1. Адаптация математического аппарата полиномов Рида-Маллера к проблематике описания квантовых цепей, позволяющая автоматизировать процесс проектирования и масштабирования квантовых цепей.
2. Методики и алгоритмы формирования многоуровневых спецификаций квантовых цепей на различных этапах проектирования.
3. Методика автоматизированной многопроходной минимизации квантовой цепи в ЛБС-нотации с применением предложенных шаблонов.
4. Архитектура LNNQCAD – подсистемы VI-среды САПР проектных решений для квантовых цепей.

Практическая ценность

Значение результатов диссертационной работы для практического применения заключается в программной реализации модульной архитектуры подсистемы LNNQCAD, которая позволяет повысить степень успешности разработок квантовых устройств в нотации квантовых цепей в VI-среде САПР за счет выгод от использования формальных языков проектных спецификаций на концептуальном уровне проектирования:

1. Проектировщику предоставляется многоуровневая спецификация квантовой цепи – комплект документации, включающий математическое описание, статистическое описание (СО), PPM, ЛБС и минимизированную ЛБС (МЛБС) спецификации на выбранную квантовую цепь (набор цепей) и имитационную модель (РККА).
2. Подсистема LNNQCAD может быть использована совместно с внешними симуляторами квантовых вычислений за счет обеспечения интероперабельности комплекса разработанных программных модулей для тестирования и минимизации как новых, так и разработанных в других средах квантовых цепей.

Практическая реализация и внедрение результатов работы

Разработанный в ходе исследования набор модулей подсистемы VI-среды САПР LNNQCAD был реализован в среде разработки ПО Visual Studio, предлагающей объектно-ориентированную модель программирования. Практическим результатом работы является подсистема САПР квантовых цепей LNNQCAD, обеспечивающая проектирование и моделирование C^mNOT и SC^mNOT классов квантовых цепей в ЛБС-нотации и формирующая многоуровневую спецификацию квантовой цепи.

Результаты диссертационной работы использовались:

Применение разработанной подсистемы LNNQCAD в учебном процессе обеспечивает поддержку дисциплины «Моделирование и анализ инженерных данных» учебного плана подготовки магистров по направлению «Информатика и вычислительная техника».

Материалы диссертационной работы использовались в 2010 г. в проекте «Разработка и реализация сетевой распределенной системы масштабной подготовки магистров и аспирантов, на основе интеграции образовательного процесса с научной и проектной деятельностью, с использованием ресурсов вузов, внедряющих инновационные образовательные программы» (Государственный контракт № П707 от 10 октября 2008 г.) при апробации совместно с ВятГУ (г. Киров) сетевых магистерских образовательных программ по направлению «Информатика и вычислительная техника».

По заявленной тематике автор является победителем конкурса научных достижений студентов и аспирантов СПбГЭТУ 2003 г., конкурса проектов аспирантов и докторантов по разделу III Темплана СПбГЭТУ на 2003-2004 г.г. по теме «Реверсивная логика в пространстве волновых функций».

Апробация работы

Основные теоретические результаты диссертационной работы докладывались на конференциях: VII Международная конференции по мягким вычислениям и измерениям SCM 2004 17.06-19.06 2004 г., V-IX Международные летние школы-семинары аспирантов и студентов «Современные информационные технологии» – Минск, БГУИР, Белоруссия, 2002-2006 г.г.; VII Республиканская научная конференция студентов и аспирантов «Но-

вые математические методы и компьютерные технологии в проектировании, производстве и научных исследованиях» – Гомель, ГГУ, Белоруссия, 2004 г.; ПЭБЧ'07 – 5-ая международная конференция “Приборостроение в экологии и безопасности человека” – СПб., ГУАП, 31.01 – 02.02 2007 г.; Всероссийская научно-техническая конференция «Наука–Производство–Технологии–Экология» – Киров, ВятГУ, 21.04 – 26.04 2005 г.; 7-ая Международная научно-практическая конференция «Образовательные, научные и инженерные приложения в среде LabView и технологии National Instruments – 2008», Москва, РУДН, 28.11–29.11 2008 г.; Всероссийская научно-техническая конференция "Общество-Наука-Инновации" – Киров, ВятГУ, 18.04 – 29.04 2010 г.; Конференции профессорско-преподавательского состава СПбГЭТУ, Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет 2003, 2004, 2006, 2007, 2011 г.

Публикации

Основные теоретические и практические результаты диссертации опубликованы в 15 статьях и докладах, среди которых 5 публикаций в ведущих рецензируемых изданиях, рекомендованных в действующем перечне ВАК, 5 публикаций в других журналах. Доклады доложены и получили одобрение на 5 международных и всероссийских научно-практических конференциях перечисленных в конце автореферата.

Структура и объем диссертации

Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения и списка литературы, включающего 141 наименование, 4-х приложений. Работа изложена на 143 страницах, содержит 77 рисунков и 17 таблиц.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертации, сформулированы цели и задачи исследования, сформулированы основные положения и научные результаты, выносимые на защиту, дана краткая характеристика их новизны, достоверности и практической ценности.

Первая глава диссертационной работы посвящена аналитическому обзору существующих средств автоматизации проектирования квантовых цепей. Рассмотрены основные решения и математические методы, модели и алгоритмы, положенных в основу синтеза квантовых цепей. Введены основные модельные представления: квантовый бит, квантовый преобразователь, библиотека квантовых преобразователей, квантовая цепь.

Квантовый бит (кубит) – единичный вектор в двумерном комплексном векторном пространстве, его собственный базис, определенный как $\{|0\rangle, |1\rangle\}$ фиксирован, где

$|0\rangle = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix}$ и $|1\rangle = \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix}$. Кубиты могут находиться в суперпозиции

$|0\rangle$ и $|1\rangle$, такой как $a|0\rangle + b|1\rangle$, где a и b комплексные числа, и

$|a|^2 + |b|^2 = 1$. *Квантовый регистр* – набор кубитов. В процессе вычислений регистр находится в состоянии суперпозиции.

Квантовый преобразователь (оператор) U над n -кубитовым регистром представляется унитарной матрицей $2^n \times 2^n$.

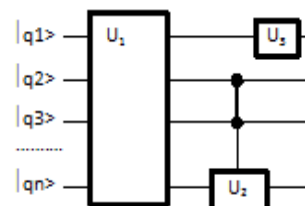


Рис.1. Пример произвольной квантовой цепи.

Квантовая цепь – это способ представления функциональных спецификации для реализации квантовых вычислений на основе изменения состояний регистра. При проектировании квантовой цепи осуществляется подбор конкретной композиции матриц преобразований, воздействующих на отдельные кубиты или их совокупность. Для графического представления квантовой цепи общепринята нотация Дойча. В этой нотации кубиты представляются как нити, на которые «нанизаны» преобразователи, воздействующие на них. Преобразователи представляются как квадратики или кружочки с соответствующими обозначениями. Управляющие преобразователи представлены как кружок или квадратик на целевом кубите и вертикальная линия управления с символами «•» (управление 1-ей) и «°» (управление 0-м) на управляющих кубитах. Время в цепи изменяется слева направо. Пример произвольной квантовой цепи приведен на рис. 1. Здесь U_1 – некий произвольный n -кубитовый квантовый преобразователь, U_2 – управляющий трехкубитовый преобразователь и U_3 – однокубитовый преобразователь. Слева представлен n -кубитовый квантовый регистр.

На основе проведенного анализа и с учетом ограничений, вносимых существующими нанотехнологиями реализации квантовых цепей, главное из которых линейно-ближайшее соседство (ЛБС) кубитов преобразователя, сформулированы требования к разрабатываемой подсистеме VI-среды САПР:

1. Подсистема САПР должна иметь программные средства генерации масштабированных спецификаций квантовых вычислений в нотации квантовых цепей.
2. Подсистема САПР должна включать программные средства для преобразования спецификации квантовой цепи к ЛБС-нотации, а так же для минимизации квантовых цепей в ЛБС-нотации для задач квантовых вычислений.
3. Подсистема должна обрабатывать результаты генерации и позволять получать статистические характеристики библиотеки квантовых цепей для выбора минимальной цепи по различным критериям.
4. Подсистема САПР должна позволять выполнить проверку корректности и имитационное моделирование как разработанных, так и существующих квантовых цепей.
5. Подсистема САПР должна интегрироваться с другими системами моделирования (симуляции) квантовых цепей.

Во второй главе рассматриваются принципы построения и архитектурные решения подсистемы САПР для проектирования квантовых цепей. Дано краткое введение в основные положения квантовой теории, определены различные классы квантовых преобразователей и способы их описания (табл. 1). Типичное квантовое вычисление представляет собой выполнение над входным значением регистра $|\varphi\rangle$ последовательности квантовых унитарных операторов $U_1U_2\dots U_m$ для получения конечного состояния $U_1U_2\dots U_m|\varphi\rangle$. Управляемые преобразователи C^mU , где m – число кубитов управления, состоят из кубитов управления и целевого кубита, могут быть поняты как обобщенный тип преобразователей, где для однокубитовых преобразователей $m=0$. Матрица U воздействует на целевой кубит, если все кубиты управления принимают требуемое состояние ($|0\rangle$ или $|1\rangle$). Определен класс квантовых цепей C^mNOT . Рассмотрены библиотеки квантовых преобразователей C^mNOT и SC^mNOT .

Рассмотрены различные методы построения модели квантовой цепи на классическом компьютере. Типичные методы проектирования квантовой цепи основаны на декомпозиции матрицы унитарного оператора – квантовой компиляции. Упрощенная схема построения цепи:



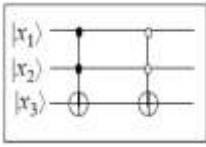
Квантовый компилятор преобразует унитарный оператор в массив элементарных квантовых преобразователей аналогично классическим компиляторам. **Плюс** этого метода – могут быть созданы любые классы квантовых цепей. **Основной недостаток** – ограниченная масштабируемость при реализации на классическом компьютере, поскольку требуется выразить матрицу унитарного оператора явно, что ведет к экспоненциальному росту ресурсов (времени и памяти).

Таблица 1

Таблица истинности для преобразователя Фейнмана:	Преобразователь	Матричная спецификация квантового преобразователя	Графическая спецификация с учетом поведения преобразователя										
<table border="1"> <tr><td>$xy\rangle$</td><td>f_{CNOT}</td></tr> <tr><td>$00\rangle$</td><td>$00\rangle$</td></tr> <tr><td>$01\rangle$</td><td>$01\rangle$</td></tr> <tr><td>$10\rangle$</td><td>$11\rangle$</td></tr> <tr><td>$11\rangle$</td><td>$10\rangle$</td></tr> </table>	$ xy\rangle$	f_{CNOT}	$ 00\rangle$	$ 00\rangle$	$ 01\rangle$	$ 01\rangle$	$ 10\rangle$	$ 11\rangle$	$ 11\rangle$	$ 10\rangle$	<i>NOT</i>	$\begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix}$	$ x_0\rangle \oplus x_0\rangle \oplus 1$
$ xy\rangle$	f_{CNOT}												
$ 00\rangle$	$ 00\rangle$												
$ 01\rangle$	$ 01\rangle$												
$ 10\rangle$	$ 11\rangle$												
$ 11\rangle$	$ 10\rangle$												
	<i>CNOT</i> (Фейнмана)	$\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}$	$ x_0\rangle \bullet x_0\rangle$ $ x_1\rangle \oplus x_1\rangle \oplus x_0\rangle$										
	<i>C²NOT</i> (Тоффоли)	$\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}$	$ x_0\rangle \bullet x_0\rangle$ $ x_1\rangle \bullet x_1\rangle$ $ x_2\rangle \oplus x_2\rangle \oplus x_0\rangle x_1\rangle$										
Таблица истинности для преобразователя SWAP:	<i>SWAP</i>	$\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$	$ x_0\rangle$ — $ x_1\rangle$ $ x_1\rangle$ — $ x_0\rangle$										
<table border="1"> <tr><td>$xy\rangle$</td><td>f_{SWAP}</td></tr> <tr><td>$00\rangle$</td><td>$00\rangle$</td></tr> <tr><td>$01\rangle$</td><td>$10\rangle$</td></tr> <tr><td>$10\rangle$</td><td>$01\rangle$</td></tr> <tr><td>$11\rangle$</td><td>$11\rangle$</td></tr> </table>	$ xy\rangle$	f_{SWAP}	$ 00\rangle$	$ 00\rangle$	$ 01\rangle$	$ 10\rangle$	$ 10\rangle$	$ 01\rangle$	$ 11\rangle$	$ 11\rangle$	<i>CSWAP</i> (Фредкина)	$\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$	$ x_0\rangle \bullet x_0\rangle$ $ x_1\rangle$ — $ x_2\rangle$ $ x_2\rangle$ — $ x_1\rangle$
$ xy\rangle$	f_{SWAP}												
$ 00\rangle$	$ 00\rangle$												
$ 01\rangle$	$ 10\rangle$												
$ 10\rangle$	$ 01\rangle$												
$ 11\rangle$	$ 11\rangle$												

В последнее время сформировался другой подход к моделированию квантовой цепи на классическом компьютере, предложенный в 2002 году К. Iwama, Y. Kambayashi и S. Yamashita, который и рассматривается в диссертации. Он основан на следующем наблюдении: квантовая цепь для стандартной квантовой задачи существенно отличается в той части цепи, которая вычисляет логические функции в зависимости от функциональной спецификации экземпляра данной задачи (например, в случае поиска Гровера).

Например, для цепи:



можно выразить состояние третьего кубита $|x_3\rangle$ в виде $|x_3 \oplus f(x_1, x_2)\rangle$, где $f(x_1, x_2) = x_1 \cdot x_2 + \overline{x_1} \cdot \overline{x_2}$. Таким образом, эта цепь может быть использована (как часть квантового алгоритма) для вычисления логической функции f . Данный метод позволяет выполнять масштабирование при моделировании на классических компьютерах. Некоторое ограничение метода – применимость к классу $C^m NOT$ квантовых цепей.

В главе рассмотрено ПРМ⁴-представление логических функций – «сложение по модулю 2» EXOR от AND минитермов, в которых каждая логическая переменная либо в прямой, либо в инверсной форме, но не в обеих. Например, набор всех логических функций 3-х переменных x_k и $b_i \in \{0, 1\}$, $0 \leq k < n$, $0 \leq i \leq 2^n - 1$, $n = 3$ (коэффициенты b_i определяют наличие минитерма в выражении) может быть представлен как:

$$f(x_0, x_1, x_2) = b_0 \oplus b_1 x_0 \oplus b_2 x_1 \oplus b_3 x_1 x_0 \oplus b_4 x_2 \oplus b_5 x_2 x_0 \oplus b_6 x_2 x_1 \oplus b_7 x_2 x_1 x_0$$

Для логической функции n переменных, чтобы сохранить результат в конце вычисления, генерируется квантовая цепь $(n + 1) \times (n + 1)$ с вспомогательным результирующим кубитом, инициализированным в ноль. Первоначально строится ПРМ (полином 0 полярности) и формируется набор ФПРМ полиномов (от 1 до $2^n - 1$). На основе полиномов ге-



Рис.2. Архитектура LNNQCAD

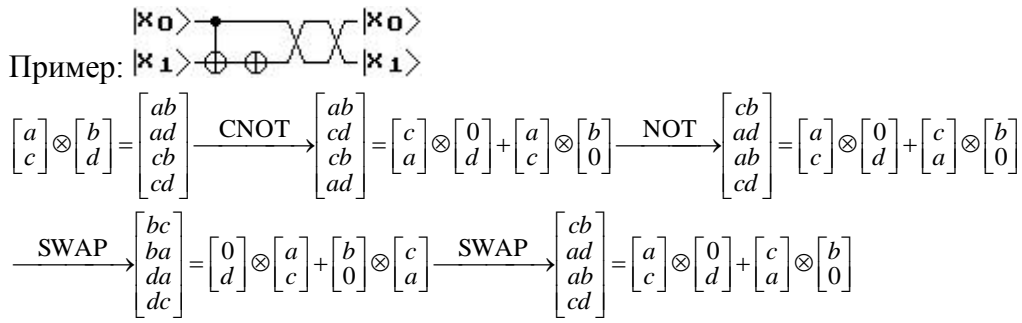
нерируются наборы квантовых схем в нотации квантовых преобразователей. В диссертации описаны процедуры генерации ФПРМ и СПРМ.

В главе также представлена архитектура подсистемы VI-среды САПР LNNQCAD (рис.2), включающая модули инструментов автоматизированного проектирования, охватывающие основные задачи синтеза, минимизации, анализа и моделирования квантовой цепи.

Третья глава посвящена вопросам лингвистического обеспечения подсистемы LNNQCAD и методикам формирования многоуровневых спецификаций.

Рассматривается алгоритм лексического анализа квантовых преобразований, на котором основан лексический анализатор (ЛАПР), позволяющий выполнять проверку корректности трассировки квантовых цепей.

⁴ Полином Риды-Маллера (ПРМ) $f(\dot{x}_0, \dots, \dot{x}_{n-1})$ имеет фиксированную полярность (ФПРМ), если на протяжении расширения каждая переменная \dot{x}_k исключительно, либо x_k , либо $\overline{x_k}$. Если для некоторых переменных появляются и x_k и $\overline{x_k}$, то полярности смешанные (СПРМ).



Рассмотрены основы рекурсивно-лексической методики генерации квантовых цепей и предложен алгоритм расстановки квантовых преобразователей, как способа представления спецификации для реализации квантовых вычислений на основе изменения состояний кубитов на примере квантового преобразования Фурье (QFT). Предложено семейство рекурсивных структурных схем W_i (рис. 3) для реализации квантового преобразователя перестановки сопряженных коэффициентов при числе кубитов $i \geq 3$.

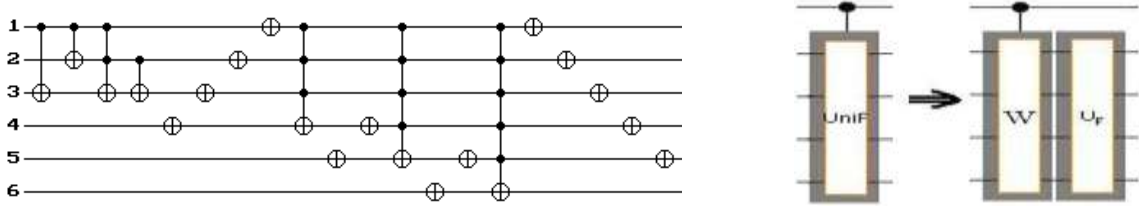


Рис.3. Рекурсивная расстановка преобразователей

Для реализации используется S^mNOT библиотека квантовых преобразователей. Для прямого и обратного преобразования QFT введен унифицированный управляемый преобразователь $CUniF$, состоящий из преобразователя Фурье UF и управляемого W_4 :

$$CUniF = \begin{cases} U_F, & \text{если кубит управления } |0\rangle \\ U_F W, & \text{если кубит управления } |1\rangle \end{cases}, \text{ где при значении } |0\rangle \text{ на управляющем кубите}$$

выполняется прямое преобразование $QFT - U_F$, а $|1\rangle$ – последовательность преобразований: перестановка W и прямое преобразование QFT .

Предложены критерии для оценки квантовой цепи. В большинстве работ по синтезу квантовых цепей используются критерии с точки зрения аппаратных затрат: количество преобразователей (КП) и квантовая сложность (КС). КС преобразователя определяется как количество элементарных операций, необходимых для реализации данного преобразователя в конкретной квантовой технологии. КС элементарного квантового преобразователя равна 1, а КС составного квантового преобразователя считается равной количеству элементарных преобразователей⁵, требующихся для его реализации.

При расчетах КС было принята, ориентируясь на технологию ЯМР. При этом для элементарных преобразователей $КС_{NOT} = КС_{CNOT} = 1$, $КС_{C2NOT} = 5$, стандартная декомпозиция C^2NOT включает 5 элементарных преобразователей, а $КС_{SWAP} = 3$, с учетом известной реализации $SWAP$ с помощью трех $CNOT$. Для S^mNOT КС рассчитываем следующим об-

⁵ A. Barenco, C. Bennett, R. Cleve, D. DiVincenzo, N. Margolus, P. Shor, T. Sleator, J. Smolin, and H. Weinfurter. Elementary gates for quantum computation. APS Physical Review A, 52:3457–3467, 1995.

разом: $КС = 2^{n+1} - 3^6$, где n – число кубитов в регистре. Так же для анализа набора спецификаций введены дополнительные критерии, учитывающие нанотехнологические ограничения реализации: сложность ЛБС-нотации (СБС) – учитывает число перестановок кубитов, глубина цепи (ГЦ) – учитывает параллельность выполнения преобразователей в цепи, сложность управления (СУ) – количество управляющих кубитов преобразователя.

Рассматривается процедура преобразования квантовой цепи к ЛБС-нотации, при этом выполняется переход от библиотеки C^mNOT к библиотеке SC^mNOT . СБС цепи в ЛБС-нотации равна 0. Минимизация цепи выполнена по двум критериям – КС и ГЦ. Для минимизации последовательностей преобразователей *SWAP* разработаны решения на основе шаблонов (рис.4). При увеличении размерности квантового регистра шаблоны наращиваются рекурсивно.

Начальное состояние	Конечное состояние	Начальное состояние	Конечное состояние
Шаблон «Лестница вверх» 		Шаблон «Лестница вниз» 	
Шаблон «Бочка» 		Шаблон «Каскад» 	
Шаблон «V↔X» 			

Рис. 4. Примеры шаблонов

Предлагается методика последовательной минимизации квантовой цепи в ЛБС-нотации, с точки зрения КП, КС и ГЦ, основанная на многопроходности и применении шаблонов.

Для имитационного моделирования предложен реконфигурируемый кластерный клеточный автомат с настраиваемой окрестностью в качестве среды реализации квантовых цепей. Процесс функционирования квантовой цепи моделируется на основе набора реконфигурируемых клеточных элементов (РКЭ). Методика использования РКЭ предполагает формирование сложных структурных схем для моделирования спроектированных квантовых цепей в виде реконфигурируемого клеточного автомата на основе кластерного подхода (РККА). Для моделирования поведения клеток кластеров введена обобщенная модель клетки с виртуальными функциями, каждая из которых при едином алгоритме параметрически настраивается на вариант клетки для ее обслуживания приданными ей методами:

```
class Kletka
{ char Zn,Act,OldZn,OldAct;
public: Kletka() {Zn='*'; Act=0;}
}
```

```
class Kletka9: public Kletka
{public:
Kletka9(char s): Kletka() {}
}
```

⁶ D. Maslov, G. W. Dueck, D. M. Miller, and C. Negrevergne. Quantum circuit simplification and level compaction. IEEE Trans. on CAD, 27(3):436–444, March 2008.

```

virtual ~Kletka() {}
void SetZn(char s) {Zn=s;}
char GetZn() {return Zn;}
void SetAct(char s) {Act=s;}
char GetAct() {return Act;}
virtual void risKletka(unsigned x,unsigned y);
virtual char Zapros() {return 0;}
void saveOld() {OldZn=Zn; OldAct=Act;}
char GetOld() {return OldZn;}    };

```

```

~Kletka9() {}

virtual
void risKletka(unsigned x,unsigned y)
{ Kletka::risKletka(x,y); risZona(9,x,y);
  if(GetAct()) risFaza(9,x,y); }
virtual char Zapros() {return 9;}
};

```

Четвертая глава содержит описание программной реализации, примеры применения разработанной подсистемы САПР для проектирования квантовых цепей, анализ результатов минимизации для контрольных квантовых цепей. Подсистема LNNQCAD организована по модульному принципу и обеспечивает гибкую перестраиваемость маршрутов проектирования в зависимости от решаемых задач, в том числе и с привлечением внешних сред проектирования (симуляции) на разных стадиях.

Пример маршрута проектирования квантовой цепи (рис. 5). Генерируется набор полиномов Рида-Маллера с трансляцией в нотацию квантовой цепи и формируется набор эквивалентных квантовых цепей (рис. 6), которые имеют разный состав (качественный и количественный) преобразователей. Далее выполняется преобразование к ЛБС-нотации и минимизация с последующим имитационным моделированием выбранных квантовых цепей. После каждого преобразования выполняется анализ: проверка корректности набора спецификаций с помощью ЛАПР и статистический анализ. В итоге формируется многоуровневая спецификация. Пример построения набора квантовых цепей представлен в табл. 2.

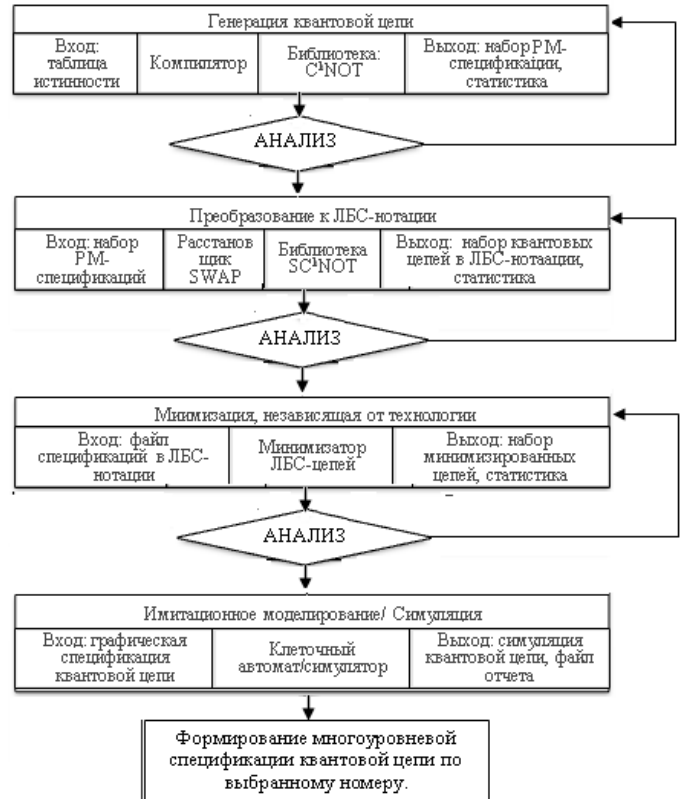


Рис.5. Обобщенный маршрут ПРМ-генерации

Таблица 2

№	x_0	x_1	x_2	$f(x_0, x_1, x_2)$	Полиномы FPRM всех полярностей	Квант. цепь
0	0	0	0	0	$f(x_0, x_1, x_2) = x_0x_1 \oplus x_0x_2 \oplus x_0 \oplus x_1$	рис. 6, а
1	0	0	1	0	$f(x_0, x_1, x_2) = x_0x_1 \oplus x_0\bar{x}_2 \oplus x_1$	рис. 6, б
2	0	1	0	1	$f(x_0, x_1, x_2) = x_0\bar{x}_1 \oplus x_0x_2 \oplus \bar{x}_1 \oplus 1$	рис. 6, в
3	0	1	1	1	$f(x_0, x_1, x_2) = x_0\bar{x}_1 \oplus x_0\bar{x}_2 \oplus x_0 \oplus \bar{x}_1 \oplus 1$	рис. 6, г
4	1	0	0	1	$f(x_0, x_1, x_2) = \bar{x}_0x_1 \oplus \bar{x}_0x_2 \oplus x_2 \oplus \bar{x}_0 \oplus 1$	рис. 6, д
5	1	0	1	0	$f(x_0, x_1, x_2) = \bar{x}_0x_1 \oplus \bar{x}_0\bar{x}_2 \oplus \bar{x}_2$	рис. 6, е
6	1	1	0	1	$f(x_0, x_1, x_2) = \bar{x}_0\bar{x}_1 \oplus \bar{x}_0x_2 \oplus x_2 \oplus 1$	рис. 6, ж
7	1	1	1	0	$f(x_0, x_1, x_2) = \bar{x}_0\bar{x}_1 \oplus \bar{x}_0\bar{x}_2 \oplus \bar{x}_2 \oplus \bar{x}_0$	рис. 6, з

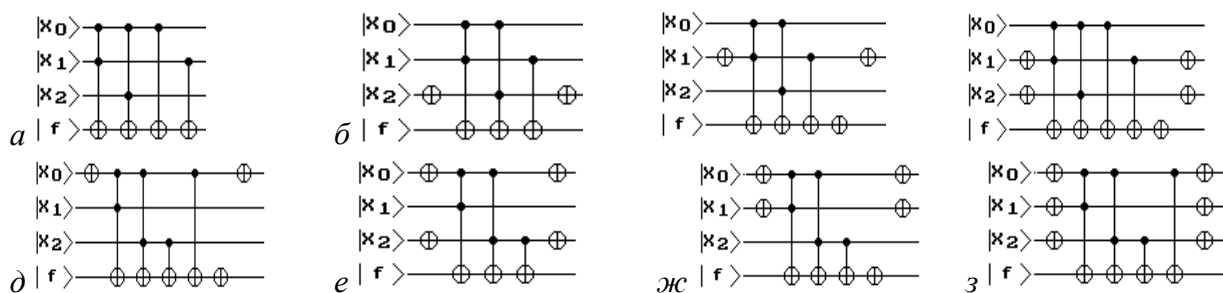


Рис. 6. Экранные формы в виде графических ПРМ-спецификаций квантовых цепей

Синтез квантовых логических цепей основан на библиотеке SC^mNOT . Первичный анализ сгенерированных цепей выполняется статистическим анализатором, результаты анализа автоматически передаются в Excel (табл. 3).

Таблица 3

№ полинома	NOT-х	C ³ NOT	C ² NOT	CNOT	NOT-f	КП	КП _{SWAP}	КП + КП _{SWAP}	КС
0	0	0	2	2	0	4	12	16	120
1	2	0	2	1	0	5	8	13	97
2	2	0	2	1	1	6	8	14	98
3	4	0	2	2	1	9	12	21	125
4	2	0	2	2	1	7	10	17	113
5	4	0	2	1	0	7	6	13	89
6	4	0	2	1	1	8	6	14	90
7	6	0	2	2	0	10	10	20	116
Min:						4	6	13	89

Преобразование цепи к ЛБС-нотации показано на примере цепи № 0 (рис.7). Используется 12 преобразователей SWAP. КП цепи может быть минимизировано, например, исключением расположенных подряд преобразователей SWAP, что уменьшает общее КП цепи на 2 и как следствие общую КС цепи. СБС левой цепи – 6, СБС правой – 0.

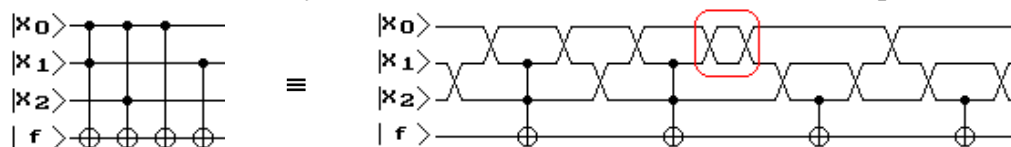


Рис. 7. Эквивалентные спецификации ПРМ и в ЛБС-нотация

В примере минимальные цепи по разным критериям: по КП минимальна цепь № 0; по КП в ЛБС-нотации – № 1; По КС – № 6. Окончательный выбор цепи зависит от требований конкретной нанотехнологии. Далее цепь в ЛБС-нотации последовательно минимизируется (МЛБС-спецификации), существенно уменьшая показатели КС и ГЦ.

В четвертой главе и приложениях приведены результаты проектирования квантовых цепей для 4-11 кубитов. Статистическое описание (СО) контрольной 8-кубитовой цепи:

Сложность цепи

№	NOT-х	C ¹ NOT	C ⁰ NOT	C ³ NOT	C ⁴ NOT	C ⁵ NOT	C ² NOT	CNOT	NOT
74	6	1	1	8	4	4	2	0	1

Результат минимизации: уменьшение КС на 53%

C [^] qubits	SWAPs	C [^] qubits+SWAPs	SWAPs Opt
27	154	181	96

Для имитационного моделирования для выбранной квантовой цепи строится РККА. В основе построения РККА лежит процесс декомпозиции комплектной квантовой цепи в последовательность РКЭ. Выполняется распределение квантовых преобразователей в

процессе проектирования на основе предварительного анализа расстановки преобразователей согласно ПРМ-спецификации квантовой цепи, для описания взаимодействия клеток в пределах общей схемы привлекаются принципы теории клеточных автоматов. Подобная модель функциональной адаптации спроектированной квантовой цепи на РККА позволяет оформить технологическую топологическую двухмерную структурную реализацию для проведения экспериментальной апробации.

Правила поведения РКЭ в составе РККА: 1) клетка активна, если хотя бы одна соседняя клетка активна, 2) активная клетка получает логическое значение соседней клетки при степени взаимодействия 1, иначе получает 0, 3) после передачи активности клетка неактивна, 4) смена состояний клеток происходит одновременно с образованием волнового фронта, 5) направление входов – выходов РККА может быть изменено, возможна замена отдельных виртуальных клеток на их дополнение (обмен входов–выходов), что характерно для обратимых РККА. Базовые РКЭ: *CNOT* (прямой, обратный и с нижним управлением), *And* и задержки.

Фрагмент программного описания для кластера *CNOT* и обратного для него:

<pre>class CNOT {protected: Kletka* FieldCNOT [3][4]; unsigned x,y; public: CNOT () {} CNOT (unsigned x1,unsigned y1) { x=x1; y=y1; FieldCNOT [0][0]=new Kletka1(1); FieldCNOT [1][0]=new Kletka8(8); ... FieldCNOT [1][1]=new Kletka3(3); FieldCNOT [2][1]=new Kletka2(2); ... } virtual ~CNOT (); void Init(char c1,char c2,char Z,char A) {FieldCNOT [c1][c2]->SetZn(Z); FieldCNOT [c1][c2]->SetAct(A); } void risCNOT (); void saveOld(); char Step(); char GetZn(char str,char slb) {return FieldCNOT [str][slb]->GetZn();} };</pre>	<pre>class RevCNOT : public CNOT {public: RevCNOT (unsigned x1,unsigned y1) { x=x1; y=y1; FieldCNOT [0][0]=new Kletka1(1); FieldCNOT [1][0]=new Kletka2(2); ... FieldCNOT [1][1]=new Kletka1(1); FieldCNOT [2][1]=new Kletka1(1); ... } ~RevCNOT (); };</pre>
--	--

Получены конкретные схемы функционирования РККА для различных квантовых цепей. На рис. 8 приведены примеры архитектурного построения композиционных РККА для преобразователей *SWAP* из 3-х кластеров *CNOT* (начальное состояние – рис. 8, а, заключительное состояние – рис. 8, б) и Фредкина (рис. 8, в), построенный на основе *C²NOT* (пунктир), с промежуточными состояниями кластеров для каждого.

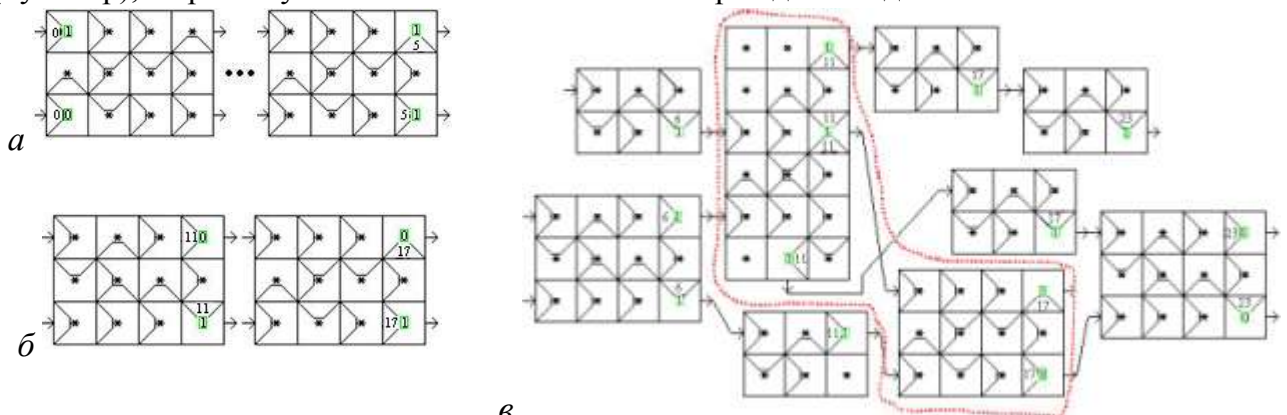


Рис. 8. РККА модели квантовых цепей

Для имитируемой технологии получена $KC_{\text{кластера}} = 1$, $KC_{\text{SWAP}} = 3$, $KC_{\text{C2NOT}} = 2$. Число тактов автомата (ТА): $ТА_{\text{SWAP}} = 17$, $ТА_{\text{Фредкин}} = 23$. $ГЦ_{\text{SWAP}} = 3$ кластера, $ГЦ_{\text{Фредкин}} = 4$. Получены конкретные схемы функционирования РККА для различных квантовых цепей.

Подсистема VI-среды САПР LNNQCAD реализует следующие функции:

1. Автоматически генерирует квантовые цепи на основе ПРМ-представления. В результате автоматически создаются библиотека ПРМ-спецификаций и библиотека графических спецификаций в ПРМ-представлении.

2. Преобразует спецификации квантовой цепи к ЛБС-нотации, автоматически формируя библиотеку графических ЛБС-спецификаций, а так же позволяет минимизировать квантовые цепи (МЛБС-спецификации) по ГЦ и КС на основе разработанных шаблонов.

3. Позволяет автоматически обработать ПРМ- и ЛБС-спецификации и получить протоколы статистического анализатора квантовых цепей в виде файлов Excel для выбора минимальной цепи по различным критериям.

4. Выполняет автоматическую проверку корректности квантовых цепей на разных стадиях проектирования (ЛАПР) и предоставляет соответствующие протоколы.

5. Решает задачи интеграции подсистемы с другими системами моделирования (симуляции) – обеспечивает интерфейсное взаимодействие с внешними симуляторами, например ZENO⁷, на основе спецификации квантовых цепей в формате LNNQCAD.

6. Обеспечивает автоматическое построение имитационной модели на РККА по выбранной спецификации квантовой цепи.

7. Функционирует под управлением операционных систем семейства Windows, исходный код модулей и компонентов подсистемы кроссплатформенный.

В итоге работы подсистемы пользователь получает многоуровневую спецификацию квантовой цепи – комплект документации, включающий математическое описание, СО, ПРМ, ЛБС и МЛБС спецификации на конкретную, выбранную по номеру цепь и РККА.

Таким образом, подсистема VI-среды LNNQCAD включает набор модулей и компонентов для автоматизации проектирования квантовых цепей и может быть использована для проведения научно-исследовательских работ, выполнения лабораторных работ, а также при курсовом и дипломном проектировании.

В заключении сформулированы основные научные и практические результаты диссертационной работы.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ДИССЕРТАЦИИ

1. Предложена методика расширения маршрутов синтеза, учитывающих реализацию квантовой цепи с учетом ограничений физической реализуемости квантовых технологий (в ЛБС-нотации), при концептуализации предметной области VI-среды САПР в проектной деятельности при проектировании квантовых цепей.
2. Проведена адаптация алгебры полиномов положительной полярности Рида-Маллера (ПРМ) для проектирования масштабируемых квантовых цепей. Описана процедура преобразования ПРМ к ЛБС-нотации.

⁷ Cabral G. E. M., Lula B., Lima A. F. ZENO: a new graphical tool for design and simulation of quantum circuits // Proc. of Defense and Security Symposium, Quantum Information and Computation III, vol. 5815, 2005. – p.p. 127–137.

3. Подготовлен набор правил преобразований спецификаций квантовых цепей классов C^mNOT и SC^mNOT и рекурсивно масштабируемый набор шаблонов для автоматической минимизации в соответствии с введенными критериями оценки сложности.
4. Разработана лингвистическая модель для квантовых преобразователей классов C^mNOT и SC^mNOT , обеспечивающая лексический анализ квантовых преобразований и позволяющая проводить проверку корректности трассировки квантовых цепей.
5. Представлена архитектура подсистемы VI-среды САПР LNNQCAD, включающая инструменты автоматизированного проектирования для процедур генерации квантовых цепей, минимизации (топологической и временной), анализа и моделирования (обеспечена совместимость с внешними симуляторами).
6. Предложены маршруты проектирования для подсистемы VI-среды САПР LNNQCAD на основе выделения классов C^mNOT и SC^mNOT квантовых преобразователей.
7. Разработана архитектура реконфигурируемого кластерного клеточного автомата для проведения имитационного моделирования по спецификации квантовой цепи.
8. Разработано программное обеспечение подсистемы VI-среды САПР LNNQCAD, обеспечивающей в соответствии с предложенными проектными процедурами формирование многоуровневых спецификаций (комплект документации, включающий математическое описание, СО, ПРМ-, ЛБС- и МЛБС-спецификации) для классов C^mNOT и SC^mNOT квантовых логических цепей на основе ПРМ представления по номеру цепи.

Публикации в изданиях, рекомендованных ВАК России:

1. Матвеева И.В. Алгебраическая структура волнового пакета [Текст] // Известия Государственного электротехнического университета, сер. «Информатика, управление и компьютерные технологии». – СПб., 2003. №2 – С.31–34.
2. Матвеева И.В. Концептуальные модели псевдоквантового поведения клеточного автомата [Текст] // Известия Государственного электротехнического университета, сер. «Информатика, управление и компьютерные технологии». – СПб., 2004. №1. – С.9–17.
3. Матвеева И.В. Квантовые логические элементы [Текст] // Известия Государственного электротехнического университета, сер. «Информатика, управление и компьютерные технологии». – СПб., 2005. №1 – С.7–12.
4. Матвеева И. В. Рекурсивно-лексическая методика расстановки квантовых преобразователей для задач автоматизированного проектирования [Текст] / И. В.Матвеева, В. А. Калмычков // Известия СПбГЭТУ «ЛЭТИ». – СПб., 2010. №. 6 – С.52–57.
5. Матвеева И.В. Моделирование квантовых цепей на виртуальном клеточном автомате [Текст] / И. В.Матвеева, В. А. Калмычков // Известия СПбГЭТУ «ЛЭТИ». – СПб., 2011. №. 5 – С.33–39.

Другие статьи и материалы конференций:

6. Матвеева И.В. Квантовые логические преобразователи [Текст] // Известия Белорусской инженерной академии (рецензируемый научно-технический журнал). – Минск, 2002. № 1(13)/2 – С. 106–110.

7. Матвеева И.В. Формальное описание поведения автоматной возбудимой среды с привлечением языка диаграмм Маллера [Текст] // Известия Белорусской инженерной академии (рецензируемый научно-технический журнал). – Минск, 2003. № 1(15)/1. – С. 39–44.
8. Матвеева И.В. Функционально-структурная полнота операционного базиса квантовых логических цепей [Текст] // Известия Белорусской инженерной академии (рецензируемый научно-технический журнал). – Минск, 2004. № 1(17)/3. – С. 202–206.
9. Матвеева И.В. Логическая интерпретация поведения квантовой системы в Гильбертовом пространстве состояний [Текст] // Материалы VII Международной конференции по мягким вычислениям и измерениям SCM 2004 17-19 июня 2004г. – СПб., 2004. Сборник докладов. Т. 1. – С. 199–203.
10. Матвеева И.В. Волновая логика поведения клеточного автомата/ И.В. Матвеева, А.С. Новосельский // Известия Белорусской инженерной академии (рецензируемый научно-технический журнал). – Минск, 2005. № 1(19)/1. – С.158–161.
11. Матвеева И.В. Моделирование квантового объекта на клеточном автомате [Текст] / И.В. Матвеева, Л.И. Матвеева // Материалы Всероссийской научно-технической конференции «Наука–Производство–Технологии–Экология» – Киров, 2005. Т. 1. – С.149–151.
12. Матвеева И.В. Методы и средства виртуализации квантовых объектов информации в антропометрических исследованиях безопасности жизнедеятельности [Текст] / И.В. Герасимов, В.А. Калмычков, И.В. Матвеева // ПЭБЧ'07 / Труды Пятой Международной конференции «Приборостроение в экологии и безопасности человека» – СПб., ГУАП, 2007. – С. 134.
13. Матвеева И.В. Парадигма виртуальности: место и роль в проектной деятельности [Текст] / И. В. Герасимов, Л. Н. Лозовой, В.А. Калмычков, И.В. Матвеева // Известия СПбГЭТУ «ЛЭТИ», «Информатика, управление и компьютерные технологии». – СПб., 2008. № 1. – С. 3-7.
14. Матвеева И.В. Моделирование в среде LABVIEW поведения квантовых логических преобразователей [Текст] / И. В. Герасимов, В.А. Калмычков, И.В. Матвеева, С.А. Кузьмин // РУДН: 7-ая Международная научно-практическая конференция «Образовательные, научные и инженерные приложения в среде LabView и технологии National Instruments - 2008», Москва, 2008. – С.130-135.
15. Матвеева И.В. Оптимизация проектирования квантовых цепей. [Текст] / И.В. Матвеева, В.А. Калмычков, Л.И. Матвеева // Всероссийская научно-техническая конференция "ОБЩЕСТВО-НАУКА-ИННОВАЦИИ": Сборник материалов: В 4 т. – Киров: Изд-во ГОУ ВПО "ВятГУ", 2010. Том 2 (ФАВТ, ФПМТ, ЭТФ). – С. 48-52.