

КВАНТОВЫЙ КОМПЬЮТИНГ ДЛЯ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ЦИФРОВЫХ СИСТЕМ

ЛИТВИНОВА Е.И., ХАХАНОВ И.В.

Предлагается квантовый подход к проектированию цифровых устройств, который характеризуется использованием элементов памяти для реализации транзакционного взаимодействия всех компонентов операционного и управляющего автоматов, а также методами синтеза и анализа, основанными на суперпозиции кубит-векторных примитивов заданы всех типов функциональностей, имплементируемых в элементы памяти, что дает возможность существенно (2-3 раза) повысить быстродействие средств моделирования.

1. Современное определение компьютеринга

Цель исследования – существенное уменьшение времени проектирования, верификации цифровых систем и повышение их качества за счет повышения быстродействия интерпретативного моделирования путем использования квантового подхода к синтезу структур данных и процессоров, обеспечивающих инновационные решения. Задачи исследования: 1) Современное определение компьютеринга. 2) Перспективы квантового компьютеринга. 3) Квантовые структуры данных. 4) Квантовое моделирование цифровых систем. 5) Примеры анализа фрагментов цифровых устройств.

Наиболее значимые рыночно-ориентированные инновации ученые делают путем использования модели компьютеринга для мониторинга и управления процессами и явлениями во всех областях деятельности человека и природы. Подтверждением сказанному могут служить модные глобальные технологии и бренды, масштабирующие модели компьютеринга: 1) Cyber-Physical Systems. 2) Internet of Things and Everything. 3) Web-, Cloud-, Mobile-, Service-, Network-, Automotive-, Big Data-, and Quantum- computing. 4) Smart Objects and Infrastructure: Enterprise, University, City, and Government. Компьютеринг – замкнутая масштабируемая система мониторинга и управления процессами и явлениями для достижения поставленной цели. Развитие компьютеринга имеет четыре выраженных фазы: 1) Сингулярный компьютеринг. 2) Сетевой компьютеринг. 3) Глобальный компьютеринг. 4) Киберфизический компьютеринг.

2. Перспективы квантового компьютеринга

Компьютер – память, в которой реализуются адресные транзакции (считывание-запись) данных. Вселенная как компьютер: гравитационно-структурированная материя – память, на которой реализуются фотонные транзакции. Иначе, гравитационно-взаимодействующие материальные структуры способны принимать и испускать энергетические потоки квантов или фотонов. Электрон имеет квантовую неопределенность в практически одной точке физического и математического простран-

ства. В этом его уникальное преимущество. Получив фотон или квант, он приобретает более высокую орбиту, которую можно интерпретировать как единицу. Отдав фотон, он опускается на уровень ниже, что можно отождествить со значением нуля. Трудно придумать более компактный компьютер, чем тот, который использует для кодирования двоичных состояний энергетический уровень электрона. Учитывая, что вся материя состоит из атомов, а значит – из электронов, человечество имеет возможность реализовать (квантовый) компьютер [1] в любой субстанции: жидкая, твердая, газообразная и плазменная. Плазменная реализация компьютера является более предпочтительной, поскольку здесь имеют место в чистом виде облака свободных электронов, отделенных от атомов, которые следует структурировать в пространственно-устойчивую вычислительную среду. Здесь бы пригодился базон Хиггса. Относительно трех других субстанций проблема заключается в том, чтобы научиться в реальном времени и достаточно быстро выращивать компьютеры из атомов, используя алгоритмы на основе безотходной технологии. Масштабируемость выращиваемых компьютеров предоставляет возможность изготавливать для рынка нано-компьютеры в размере клетки и супервычислители для массовых параллельных транзакций в киберпространстве больших данных. Это наше недалекое будущее. Однако уже сегодня можно и нужно использовать преимущества квантового компьютеринга [2] в классических вычислителях. В этом случае неопределенность будет представлена двумя битами или двумя точками физического пространства. Идеальной демонстрацией изоморфизма “квантовых” структур данных и квантовых обозначений механики Дирака является алфавит и алгебра Кантора. В последней символы алфавита $A = \{0, 1, X = \{0,1\}, U\}$ кодируются двоичными векторами (10, 01, 11, 00) соответственно. Свойство перепутывания отождествляется с неопределенностью состояния X , которое задает в математической точке пространства одновременное существование 0 и 1. Свойство суперпозиции связано с выполнением операции дизъюнкции над символами алфавита Кантора или его кодами. Свойство параллелизма основано на выполнении регистровых операций (И, ИЛИ, НЕ) над квантовыми структурами данных. Свойство осведомленности (телепортации) использует операцию отрицания или инверсии, когда каждое из двух состояний знает друг о друге все и на любом расстоянии. Существует изоморфизм между квантовой механикой Дирака и алгеброй Кантора, которая имеет символ двоичной неопределенности. Наряду с совершенствованием технологии исполнения квантового компьютера, необходимо параллельно разрабатывать новые квантовые подходы программирования затратных алгоритмов для решения оптимизационных задач.

3. Квантовые структуры данных

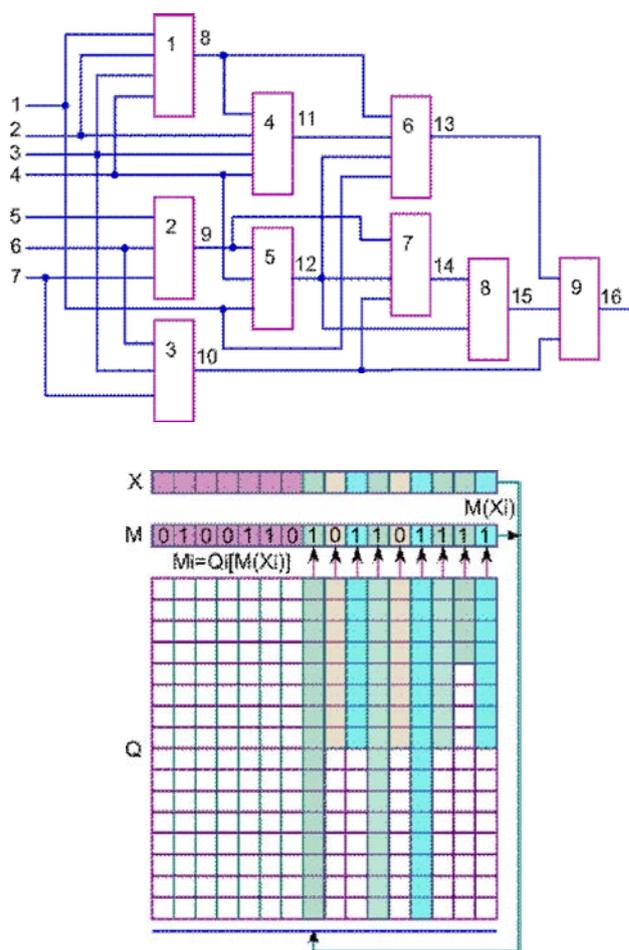
Кубит (n -кубит) [3] это векторная форма унитарного кодирования универсума из n примитивов для задания

булеана состояний 2^{2^n} с помощью 2^n двоичных переменных. Например, если $n=2$, то 2-кубит задает 16 состояний с помощью четырех переменных. Если $n=1$, то кубит задает четыре состояния на универсуме из двух примитивов (10) и (01) с помощью двух двоичных переменных (00,01,10,11) [1,10]. При этом допускается суперпозиция (одновременное существование) в векторе 2^n состояний, обозначенных примитивами. Кубит (n-кубит) дает возможность использовать параллельные логические операции квантового процессора вместо поэлементных теоретико-множественных для существенного ускорения процессов анализа цифровых проектов. Квантовый процессор может быть любой конечной размерности: вектор, матрица, куб. Для структуры, содержащей два измерения, он представлен матрицей столбцов или Q-векторов, которые формируют соответствующие им ячейки M-вектора моделирования (рис. 1). Вектор M, совместно с X-вектором кортежей входных переменных примитивов создает структуру взаимных связей между столбцами-элементами. Адрес ячейки Q-покрытия, формирующей состояние невходного i-разряда M-вектора, определяется содержимым ячеек M-вектора, найденным по адресам, заданным i-кортежем вектора входных переменных. Каждый вектор Q_i , равно как и кортеж X_i вектора номеров входных линий, имеет адресную связь с M_i -ячейкой вектора моделирования. Квантовый процессор может входить компонентом в состав более сложной системы. Квантовая модель процессора имеет следующую структуру.

В аналитической модели W (см. рис. 1) представлены [4]: 1) Упорядоченная адресно-доступная Q-совокупность квантовых примитивов, формирующих функциональность системы. 2) Вектор моделирования M, связывающий все примитивы в единую систему на основе идентификации эквивалентных линий, которые создают формат из существенных переменных: входных, внутренних и выходных. 3) Вектор X кортежей упорядоченных номеров входных переменных для каждого квантового примитива, которые формируют адреса доступа к ячейкам Q-векторов примитивов. Вектор количества входных переменных примитива $|X|$ формирует адресное пространство или длину каждого Q-покрытия.

Аксиомы квантового (only memory-based) процессора [5-7]: 1) В квантовом процессоре нет ничего, кроме адресуемой памяти. 2) Вычислительный процесс представлен единственной универсальной транзакцией между адресуемыми компонентами памяти $M_i = Q_i[M(X_i)]$. 3) Транзакция есть универсальная процедура считывания-записи данных на непустом множестве адресуемых элементов памяти. 4) Все компоненты памяти являются online-generated, благодаря их адресной связности. 5) Комбинационные логические элементы (reusable logic), равно как и последовательные (sequential components), исполняются на элементах памяти. 6) Связывание всех компонентов в

вычислительную систему осуществляется посредством (цифровой) идентификации псевдо-гальванических соединений вход-выходных переменных компонентов схемы, формирующих вектор моделирования, который хранит состояния всех существенных линий цифровой системы. 7) Все компоненты квантовой модели цифровой системы: $W = \langle Q, M, X \rangle$, включая функциональные модули, вектор моделирования, вектор адресов входных переменных, являются online перепрограммируемыми, а значит – online ремонтпригодными. 8) Примитив цифровой системы имеет формат $W = \langle Q, Y, X \rangle$, поскольку отдельный элемент не имеет связей и вектора M, создающих из отдельных компонентов систему.



$$\begin{aligned}
 W & ((Q, M, X (, \\
 Q & ((Q_1, Q_2, \dots, Q_i, \dots, Q_n), \\
 Q_i & ((Q_{i1}, Q_{i2}, \dots, Q_{ij}, \dots, Q_{ik_i}); \\
 M & ((M_1, M_2, \dots, M_i, \dots, M_n); \\
 X & ((X_1, X_2, \dots, X_i, \dots, X_n), \\
 X_i & ((X_{i1}, X_{i2}, \dots, X_{ij}, \dots, X_{im_i}); \\
 M_i & (Q_i[M(X_i)]; k_i (2^{m_i}.
 \end{aligned}$$

Рис. 1. Схема, кубитные структуры данных и модель квантового процессора

4. Квантовое моделирование цифровых систем

Использует memory-based only модели для адресного анализа цифровых систем в целях их верификации.

Реализация таких структур связана с ячейками памяти (LUT (Look Up Table) FPGA), которые способны хранить информацию в виде Q-вектора, где каждый бит или разряд имеет свой адрес, отождествляемый с входным словом. Программная реализация алгоритма моделирования таких структур становится конкурентоспособной по быстродействию на рынке проектирования цифровых систем на кристаллах за счет адресации функциональных примитивов. Одномерный Q-вектор описания функциональности можно привязать к выходной (внутренней) линии устройства, состояние которой формируется в процессе моделирования рассматриваемого Q-покрытия. Тогда регистровая реализация комбинационного устройства может быть представлена вектором моделирования M, невходные линии которого непосредственно связаны с выходами функциональных элементов. Упорядоченные значения входных переменных задают адрес бита Q-вектора, формирующего состояние рассматриваемой невходной линии. Если функциональности описываются одновыходовыми примитивами, то каждый из них можно отождествить с номером или координатой невходной линии, на которую нагружен данный элемент. Если функциональность многovýchодовая, то Q-покрытие представляется матрицей с числом строк, равным числу выходов. Эффект от такого примитива заключается в параллелизме одновременного вычисления состояний нескольких выходов за одно обращение к матрице по текущему адресу. Данное обстоятельство является существенным аргументом в пользу синтеза обобщенных кубитов для фрагментов цифрового устройства или всей схемы в целях их параллельной обработки на одном временном такте. Модель функционирования цифровой структуры упрощается до вычисления двух адресов при формировании вектора моделирования $M_i = Q_i[M(X_i)]$ путем исключения сложного адреса выхода примитива в процессе записи состояний выходов в координаты M-вектора. Алгоритм моделирования квантовых примитивов цифровой схемы представлен на рис. 2 [8].

0) Инициирование начальных условий и параметров. 1) Задание очередного набора двоичных состояний на входных координатах вектора моделирования. 2) Определение i-номера очередного обрабатываемого примитива путем выполнения операции инкрементирования. 3) Выполнение процедуры конкатенации состояний битов M-вектора, соответствующих номерам вектора входных переменных X_i . Считывание соответствующего бита из кубит-покрытия Q_i по двоичному вектор-адресу сконкатенированных битов M-вектора. Занесение считанного из кубита бита в вектор моделирования M по адресу i. (M-вектор может иметь координаты с символами X, что дает возможность выполнять троичное моделирование цифровых устройств для решения задач тестирования и верификации.) 4) Если не все примитивы обработаны $i < n$, выполняется переход к пункту 2 алгоритма. 5) Если не все входные наборы обработаны $t < m$, выполняется переход к пункту 1. 6) Конец моделирования.

На рис. 2 представлена схема с триггерами и комбинационной логикой, которая также описана в виде элемен-

тов памяти, куда занесены выходные состояния таблицы истинности каждого логического элемента. Структуры данных, необходимые для моделирования цифрового устройства, сведены в таблицу, где основными компонентами являются: M – вектор моделирования или состояния занумерованных линий, который в данном случае имеет 5 входных, 6 внутренних и выходных линий, состояния которых подлежат определению; X – вектор кортежей номеров входных линий примитивов, которые необходимы для формирования адреса в целях извлечения по нему состояния выхода элемента Q_i , функциональность которого задается Q-вектором. Все примитивы схемы должны быть упорядочены по принципу: очередной элемент анализируется, если все предшественники для него были обработаны.

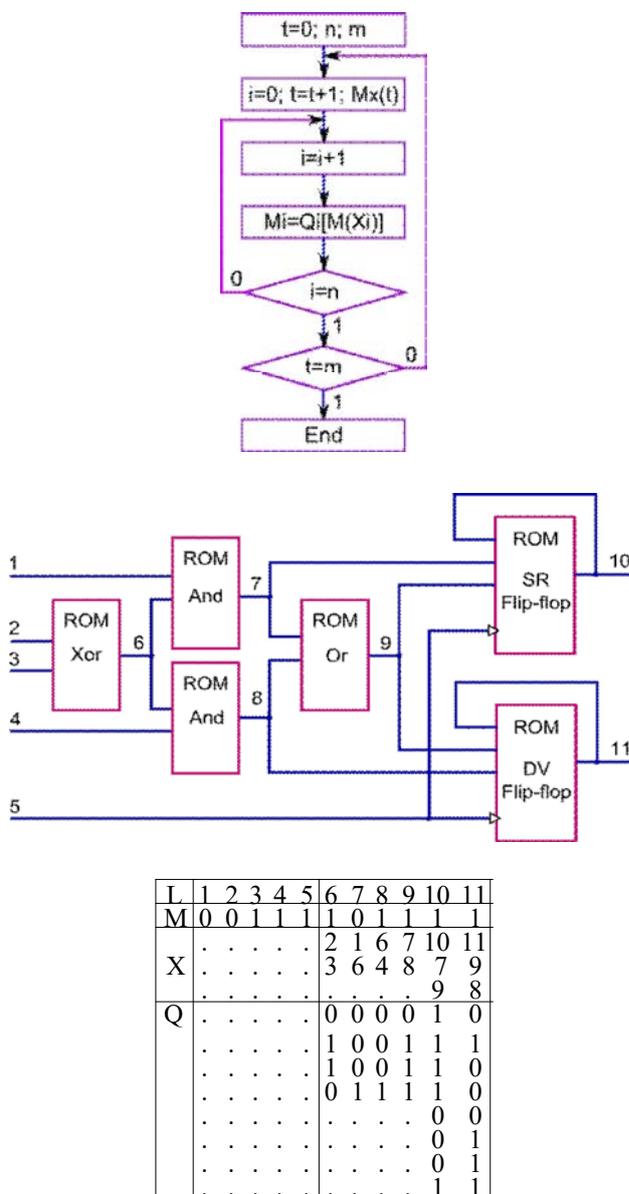


Рис. 2. Алгоритм моделирования и пример цифровой схемы с триггерами

В процессе моделирования адресно-извлеченное состояние ячейки текущего Q-покрытия заносится в разряд M_i вектора моделирования. Результаты после-

довательной обработки всех Q-векторов схемной структуры формируют состояния линий M-вектора для приведенного выше примера ячейки (6 – 11). Первоначальные состояния неопределенностей на псевдовходах функциональных примитивов доопределяются сигналами нуля или единицы в зависимости от внутренней технологической культуры компании, предоставляющей промышленные средства моделирования и верификации. Количество входных переменных примитива q связано с длиной Q-вектора соотношением: $\text{card}(Q) \sim 2^q$. Правильность работы алгоритма моделирования была верифицирована на тестовых и реальных схемах с привлечением средств Active HDL 9.1 (Aldec Inc.). Особенность структурно-функционального задания цифровой системы заключается в представлении всех примитивов элементами памяти, куда записываются Q-векторы выходных состояний. Выводы: 1) Любые структурные компоненты вычислительных устройств, комбинационные и/или последовательностные, а также системы в целом можно описывать кубитными Q-векторами и реализовывать в элементах памяти FPGA, CPLD или VLSI. 2) Memory-based интерпретативное адресно-ориентированное моделирование комбинационных и последовательностных примитивов цифровых устройств становится соизмеримым по быстродействию с компилятивным анализом дискретных объектов.

5. Заключение

Предложен квантовый подход к проектированию цифровых устройств, который характеризуется: 1) использованием элементов памяти для реализации транзакционного взаимодействия всех компонентов операционного и управляющего автоматов. 2) Методами синтеза и анализа, основанными на суперпозиции кубит-векторных примитивов задания всех типов функциональностей, имплементируемых в элементы памяти, что дает возможность существенно (в 2-3 раза) повысить быстродействие средств моделирования. Практическая значимость квантового синтеза и анализа цифровых систем: 1) Реализация процессора только на основе использования элементов памяти делает возможным ремонт в режиме online за счет применения на кристалле универсальных адресуемых sparse-компонентов памяти. 2) Имплементация квантовых only memory-based моделей описания цифровых компонентов и систем непосредственно связана с увеличением выхода годной продукции, повышением надежности вычислительных изделий, снижением стоимости проектирования и изготовления, автономным online восстановлением работоспособности без участия человека [9,10].

Литература: 1. *Stenholm Stig, Kalle-Antti Suominen.* Quantum approach to informatics. John Wiley & Sons, Inc. 2005. 249p. 2. *Литвинова Е.И., Хаханов И.В., Сергиенко В.* Синтез и анализ «квантовых» моделей цифровых систем // АСУ и приборы автоматки. 2015. Вып. 172. С. 56-70. 3. *Hahanov V.I., Wajeb Gharibi, Litvinova E.I., Shkil A.S.* Qubit data structure of computing devices // Electronic modeling.

№1. 2015. P.76-99. 4. *Hahanov V.I., Tamer Bani Amer, Chumachenko S.V., Litvinova E.I.* Qubit technology analysis and diagnosis of digital devices. "Electronic modeling." Volume 37, № 3. 2015. P. 17-40. 5. *Vladimir Hahanov, Tamer Bani Amer, Ivan Hahanov.* MQT-model for Virtual Computer Design // Microtechnology and Thermal Problems in Electronics. 2015. P. 182-185. 6. *Ivan Hahanov, Tamer, Irina Hahanova, Sergey Dementiev.* Automaton MQT-model for Virtual Computer Design. CADSM, Polyana, Ukraine. 2015. P.27-31. 7. *Хаханов В.И., Обризан В.И., Зайченко С.А., Хаханов И.В.* MQT-автомат для анализа больших данных // АСУ и приборы автоматки. Вып. 168. 2014. С. 64-72. 8. *Хаханов В.И., Зайченко С.А., Мищенко А.С., Хаханов И.В.* Процессорные структуры для анализа Big Data // АСУ и приборы автоматки. Вып.169. 2014. С. 4-15. 9. *Wajeb Gharibi, Vladimir Hahanov, Eugenia Litvinova, Ivan Hahanov.* «Quantum» Structures for Digital Systems Synthesis // IEEE East-West Design & Test Symposium. Batumi. 2015. P. 115-122. 10. *Vladimir Hahanov, Igor Yemelyanov, Volodymyr Obrizan, Ivan Hahanov.* "Quantum" Diagnosis and Simulation of SoC // XIth Intern. Conf. MEMSTECH-2015. P. 58-60.

Транслитерированный список литературы: 1. *Stenholm Stig, Kalle-Antti Suominen.* Quantum approach to informatics. John Wiley & Sons, Inc. 2005. 249p. 2. *Litvinova E.I., Hahanov I.V., Sergienko V.* Sintez i analiz «kvantovyh» modelej cifrovyyh sistem // ASU i pribory avtomatiki. Vyp. 172. 2015. S. 56-70. 3. *Hahanov V.I., Wajeb Gharibi, Litvinova E.I., Shkil A.S.* Qubit data structure of computing devices // Electronic modeling. № 1. 2015. P.76-99. 4. *Hahanov V.I., Tamer Bani Amer, Chumachenko S.V., Litvinova E.I.* Qubit technology analysis and diagnosis of digital devices. "Electronic modeling." Vol. 37, № 3. 2015. P. 17-40. 5. *Vladimir Hahanov, Tamer Bani Amer, Ivan Hahanov.* MQT-model for Virtual Computer Design // Microtechnology and Thermal Problems in Electronics. 2015. P. 182-185. 6. *Ivan Hahanov, Tamer Bani Amer, Irina Hahanova, Sergey Dementiev.* Automaton MQT-model for Virtual Computer Design. CADSM, Polyana, Ukraine. 2015. P.27-31. 7. *Hahanov V.I., Obrizan V.I., Zajchenko S.A., Hahanov I.V.* MQT-avtomat dlja analiza bol'shih dannyyh // ASU i pribory avtomatiki. Vyp. 168. 2014. S. 64-72. 8. *Hahanov V.I., Zajchenko S.A., Mishhenko A.S., Hahanov I.V.* Processornye struktury dlja analiza Big Data / / ASU i pribory avtomatiki. №.169. 2014. S. 4-15. 9. *Wajeb Gharibi, Vladimir Hahanov, Eugenia Litvinova, Ivan Hahanov.* «Quantum» Structures for Digital Systems Synthesis // IEEE East-West Design & Test Symposium. Batumi. 2015. P. 115-122. 10. *Vladimir Hahanov, Igor Yemelyanov, Volodymyr Obrizan, Ivan Hahanov.* "Quantum" Diagnosis and Simulation of SoC // XIth Intern. Conf. MEMSTECH-2015. P. 58-60.

Поступила в редколлегию 10.12.2015

Литвинова Евгения Ивановна, д-р техн. наук, профессор кафедры АПВТ ХНУРЭ. Научные интересы: техническая диагностика цифровых систем, сетей и программных продуктов. Адрес: Украина, 61166, Харьков, пр. Ленина, 14, тел. +380 57 70-21-326. E-mail: kiu@kture.kharkov.ua.

Хаханов Иван Владимирович, студент факультета компьютерной инженерии и управления ХНУРЭ. Научные интересы: техническая диагностика цифровых систем, программирование. Увлечения: горные лыжи, английский язык. Адрес: Украина, 61166, Харьков, пр. Ленина, 14, тел. +380 57 70-21-326.