УДК. 004.2; 004.383; 519.6

В. А. Калмычков, И. В. Матвеева Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина)

Автоматизированное проектирование квантовых цепей с регулярной структурой на примере модуля перестановок для КПФ

Предложен подход к автоматической генерации спецификаций квантовых цепей на логическом уровне схем размещения квантовых преобразователей для задач, решение которых может быть описано на математическом уровне с использованием рекурсивных схем. Обозначены пути уменьшения числа квантовых преобразователей и глубины квантовой цепи на основе выделения участков с квантовыми преобразователями из семейства С^kNOT, имеющих регулярную структуру. Предложен вариант реализации вспомогательного модуля перестановки сопряженных коэффициентов при унификации квантового преобразования Фурье для проведения обратного преобразования с применением вспомогательного модуля. Обозначена схема адаптации многокубитового преобразователя логического уровня описания к базовым преобразователям физического уровня. Выбран способ фиксации спецификации квантовой цепи в виде программного кода на языке OpenQASM с ограниченным набором преобразователей. Представлены результаты испытаний получаемых в автоматическом режиме спецификаций квантовых цепей при использовании облачного сервиса IBM Quantum с разными системами – симулятором и пятикубитовыми квантовыми компьютерами.

Квантовое преобразование Фурье (КПФ), кубиты, квантовые преобразователи, квантовая цепь

Эра квантовых компьютеров практически наступила. Теоретические основы квантовых вычислений были заложены в последней трети XX в. Основополагающие предложения по представлению квантовых алгоритмов и особенностям их реализации были оформлены в классических работах А. Баренко с соавторами [1] и М. Нильсена с И. Чуангом [2], в том числе определены универсальные наборы базовых квантовых преобразователей и правила их компоновки или декомпозиции при проектировании квантовых цепей. Основываясь на этих фундаментальных принципах архитектуры квантового вычислительного процесса, в признанных мировых центрах на протяжении первых 15 лет нынешнего столетия проводились исследования по разработке и испытаниям квантовых устройств, функционирующих на разных физических принципах: ядерный магнитный резонанс [3], ионные ловушки [4], фотоны [5], системы квантовых точек и сверхпроводимость [6]. Одновременно исследователями велась теоретическая проработка вопросов, связанных с оптимизацией квантовых алгоритмов и их адаптацией под физические особенности функционирования предполагаемых воплощений квантовых компьютеров.

В последнее пятилетие произошел существенный прорыв в технологической базе квантовых устройств, и крупнейшие корпорации («D-Wave» [7], «Google» [8], «Microsoft», «Intel» и IBM [9]) представили свои действующие квантовые компьютеры или их прототипы. На данный момент поддерживаемое в них число используемых кубитов достигло нескольких десятков. Этого крайне недостаточно для организации существенных вычислительных процессов, для которых требуется задействовать даже не сотни и тысячи кубитов – речь должна идти о наличии сотен тысяч кубитов. Основные проблемы: короткое время устойчивого состояния квантовой системы в целом и нестабильное поведение отдельных физических кубитов, значительные погрешности при реализации квантовых преобразований. Однако любой практический опыт в использовании квантовых технологий обеспечивает продвижение в этой области перспективных исследований, достижение предполагаемого квантового превосходства в компьютерных вычислениях и получение ожидаемого существенного коммерческого эффекта.

.....

Необходимо отметить, что в это же время и Россия присоединилась к разработке квантовых компьютеров. На основе федерального проекта создан консорциум «Национальная квантовая лаборатория» под эгидой корпорации «Росатом» [10]. Поставлена задача создания в ближайшие годы квантовых компьютеров существенной мощности на нескольких технологических (по физическим принципам работы) платформах.

Важным прорывом для исследовательской базы оказался облачный сервис корпорации IBM по предоставлению открытого доступа [9] к части созданных ею квантовых компьютеров. Это позволяет проводить экспериментальное изучение квантовых алгоритмов на вычислительных устройствах элементарного уровня (пока массовый доступ открыт для квантовых устройств из 5 кубитов).

Основные сведения по представлению квантовых алгоритмов. Для визуального представления квантовой цепи на логическом уровне обычно используется графическая нотация Дойча [1]. На изображении кубиты представлены горизонтальными линиями, на которых размещаются квантовые преобразователи (одно-, двух- и многокубитные) в виде кругов и/или квадратов с символическими обозначениями выполняемых операций. Взаимодействие преобразователя с несколькими кубитами изображается вертикальной линией. Каждая квантовая операция (преобразователь) описывается конкретной квадратной матрицей, состояние кубита - вектором, а их совокупности – тензорным произведением векторов [1]. Для представления квантового алгоритма используется унифицированный набор преобразователей, среди которых можно выделить преобразователи с управляющими кубитами (часто отмечаются символом «•» при управлении «единицей») и целевым кубитом (для преобразователя NOT обычно обозначается окружностью с плюсом внутри). Последовательность операций в соответствии с нотацией выполняется слева направо, при этом допускается одновременное (параллельное) выполнение нескольких операций над разными кубитами (выстраивание преобразователей на одной вертикали). Важными метрическими характеристиками квантовой цепи служат число используемых преобразователей и их качественный состав (в связи с особенностями их физического воплощения и набором физических действий для реализации функционала конкретного преобразователя), а также глубина цепи с учетом параллельно размещенных преобразователей (определяет необходимое для выполнения время).

Общая характеристика области наших исследований. В настоящее время в мире продолжается выбор и развитие технологической базы квантовых компьютеров, окончательного решения по единой физической платформе нет, рассматриваются варианты на разных физических принципах, но в последнее время приоритетным направлением становится сверхпроводимость. Реальные физические процессы обеспечивают возможность использования ограниченного набора одно- и двухкубитовых квантовых преобразователей. При этом изменяется понимание архитекторов квантовых систем относительно принципов взаимного расположения взаимодействующих физических кубитов: от изначально используемого варианта их линейного размещения сейчас переходят к сложным плоскостным конфигурациям выделяемых совокупностей кубитов (квадратные рассматриваются как самые простые из возможных решеток). Однако проектирование логического наполнения (расстановки квантовых преобразователей) квантовой цепи продолжает оставаться ручным занятием, что при росте числа кубитов до нескольких десятков и задействования для них сотен квантовых преобразователей становится нетривиальным. Поэтому назрела необходимость предоставления возможности автоматизированной генерации квантовых цепей с учетом особенностей разных видов квантовых вычислений. Группы исследователей [11] прорабатывают вопросы автоматизации этого процесса и высказывают пожелания о разработке систем автоматизированного проектирования (САПР) в области квантовых вычислений.

Наши исследования сосредоточены на вопросах проектирования квантовых цепей на логическом уровне описания их спецификаций, требующих рассмотрения вариантов выбора и размещения квантовых преобразователей, воздействующих на конечный набор кубитов. Для этого предлагается создавать традиционные приложения, позволяющие по возможности проводить автоматизированную генерацию таких спецификаций в формате, который может быть передан на исполнение квантовым компьютерам.

Проводимые нами исследования направлены на применение преобразователей из семейства С^kNOT (класс *k*-кубитовых преобразователей) и обмена двух кубитов SWAP. С^kNOT реализует функцию

 $(x_1, ..., x_k, y) \rightarrow (x_1, ..., x_k, y \oplus x_1 \cdot x_2 \cdot ... \cdot x_k)$ и инвертирует целевой кубит в случае, когда все управляющие кубиты имеют значение |0> или |1>(векторы 0 или 1) в зависимости от типа управления, что реализуется операциями EXOR для целевого кубита и AND для управляющих кубитов. Например, к ним относятся квантовые преобразователи NOT (C⁰NOT) и управляемый одним кубитом CNOT (C¹NOT), входящие в унифицированный базовый набор, а также широко используемый при проектировании преобразователь Тоффоли – управляемый двумя кубитами CCNOT (C²NOT).

Ранее нами на теоретическом уровне был рассмотрен общий подход к проектированию рекурсивной схемы [12] вспомогательного модуля (ВМКПФ) перестановки сопряженных коэффициентов для квантового преобразования Фурье (КПФ, Quantum Fourier Transform – QFT) [1] с целью формирования унифицированного квантового модуля, обеспечивающего выполнение по единой схеме прямого и обратного преобразований:

$$W_{i,N}' = \begin{cases} W_{3} = \text{CNOT}_{(2) \to 3} \text{CNOT}_{(1,2) \to 3} \times \\ \times \text{CNOT}_{(1) \to 2} \text{CNOT}_{(1) \to 3}, \text{ если } i = 3; \\ \text{NOT}_{(1..N-1)} \text{CNOT}_{(1..N-1) \to N} \times \\ \times \text{NOT}_{(1..N)} W_{i,N-1}', \text{ если } N = 4; \\ \text{CNOT}_{(1..N-1) \to N} \text{NOT}_{(N-1,N-2)} \times \\ \times \text{NOT}_{(1,2)} W_{i,N-1}', \text{ если } i = 4; \\ \text{CNOT}_{(1..N-1) \to N} \text{NOT}_{(N-1,N-2)} \times \\ \times W_{i,N-1}', \text{ если } i > 4 \text{ и } i < N; \\ \text{NOT}_{(1..N-1)} \text{CNOT}_{(1..N-1) \to N} \times \\ \times \text{NOT}_{(1..N-1)} \text{CNOT}_{(1..N-1) \to N} \times \\ \times \text{NOT}_{(N-1,N-2)} W_{i,N-1}', \text{ если } i = N, \end{cases}$$

где $NOT_{(1...N-1)}$ – преобразователь NOT с указанием в скобках порядковых номеров кубитов, для которых он применяется; $CNOT_{(1..N-1)\rightarrow N}$ –

преобразователь из семейства C^k NOT с указанием в скобках порядковых номеров управляющих кубитов и после стрелки номера управляемого кубита (нумерация осуществляется с единицы).

Также был предложен способ лексической верификации [13] на основе символьного отслеживания состояний кубитов в процессе выполнения квантового алгоритма для вспомогательного модуля. Однако возможности традиционных компьютеров позволяли провести подготовку и вери-

фикацию ВМКПФ лишь для нескольких кубитов, а проанализировать его применимость в совместном использовании с КПФ было практически невозможно. Современная доступность пусть и простейших квантовых компьютеров и развитый интерфейс инструментов для взаимодействия с ними позволяют существенно расширить рамки практических исследований по применимости предложенных нами подходов к подготовке квантовых алгоритмов.

Краткая характеристика используемого инструментария для исследований. В настоящее время облачный сервис IBM Quantum [9] предоставляет возможность:

 подготовить графическую нотацию квантовой цепи на логическом уровне с использованием расширенного набора квантовых преобразователей (одно-, двух- и трехкубитовых);

 транслировать ее на физический уровень, использующий ограниченный унифицированный набор квантовых преобразователей (одно- и двухкубитовых), определенный еще на теоретическом уровне [1];

 провести верификацию корректности квантовых цепей;

 выполнить квантовый алгоритм на симуляторах с представлением результатов;

выполнить квантовый алгоритм на квантовых компьютерах (доступны варианты до 65 кубитов, но свободный доступ ограничен 5 кубитами) с представлением результатов.

Дополнительно для использования с платформой облачных квантовых вычислений IBM Quantum paзpaботан открытый квантовый язык ассемблера OpenQASM [14] как более привычный для программистов инструмент для представления квантового алгоритма (формально его можно отнести к языкам описания аппаратного обеспечения, оформляющего в командном режиме расстановку квантовых преобразователей). Используемые в исследовании квантовые преобразователи из семейства C^kNOT представлены в ОреnQASM следующими командами: NOT – х, CNOT – сх, CCNOT (Тоффоли) – ссх.

К сожалению, наличие такого развитого инструментария не избавляет от необходимости ручного поэлементного формирования в IBM Quantum графической нотации квантовой цепи или набора последовательности команд на OpenQASM. Помимо нежелательных ошибок при таких действиях более проблематичным становится отслеживание десятков, а скоро и сотен кубитов и тысяч квантовых преобразователей или соответствующих им строк программного кода. Из примера рекурсивного описания ВМКПФ очевидно, что оно имеет некоторую регулярную структуру оформления расстановки квантовых преобразователей, повторяемость размещения групп элементов с необходимостью настройки на конкретику ситуационных схемотехнических решений. Решение чрезвычайно простое – одним из результатов стало разработанное нами приложение, которое по рекурсивному описанию с регулярной структурой ВМКПФ автоматически генерирует соответствующий ему программный код на OpenQASM, который затем загружается в IBM Quantum с получением соответствующей графической нотации и возможностями по его верификации и исполнению на предоставленных в доступ симуляторах и квантовых компьютерах. Естественно при этом потребовалось учитывать особенности предоставленного базового набора преобразователей с адаптацией к нему используемых в ВМКПФ многокубитовых преобразователей. Представленный далее иллюстративный материал подготовлен на основе скриншотов, которые предоставляет сервис IBM Quantum.

Полученные в процессе исследования результаты. В первую очередь кратко дадим общую характеристику архитектурных особенностей реализации такого приложения, которые обусловлены доступным в IBM Quantum набором квантовых преобразователей, что обязательно должно учитываться. Для примера рассматривается процедура оформления квантовой цепи ВМКПФ для 6 кубитов (на рис. 1-6 линии кубитов пронумерованы и начинаются с символа q от qubit). Согласно полному рекурсивному описанию [12] нужно сформировать описание (рис. 1) из двух частей: базовая часть для трех кубитов представлена слева четырьмя преобразователями, за которыми размещены регулярные по структуре блоки из преобразователей NOT и С^kNOT.



В соответствии с базовыми правилами [1] рассмотрения последовательности преобразователей отметим, что следующие друг за другом пары одинаковых C^kNOT должны быть удалены как взаимно поглощающиеся. После удаления парных NOT мы получаем представленную на рис. 2 квантовую цепь.



В IBM Quantum нет многокубитовых преобразователей C^kNOT, все ограничивается трехкубитовыми преобразователями на логическом уровне проектирования квантовой цепи как предварительный отсыл к усеченному набору одно- и двухкубитовых преобразователей физического уровня. Поэтому представленные на рис. 1 и 2 квантовые цепи не могут быть спроектированы в IBM Quantum. Согласно [1] многокубитовый преобразователь C^kNOT может быть адаптирован в схему разложения на последовательность преобразователей Тоффли (C²NOT), результат этой процедуры представлен на рис. 3. Для выполнения данной процедуры требуется наличие дополнительных кубитов для хранения промежуточных результатов, состояния которых должны впоследствии быть возвращены к исходному. Требуемое число дополнительных кубитов определяется числом управляющих кубитов k по формуле k - 2. В итоге вместо одного многокубитового преобразователя С^kNOT образуется «клиноподобная» последовательность из преобразователей Тоффли. Для перехода к дополнительным кубитам и обратно используются квантовые преобразователи SWAP, обеспечивающие обмен состояний двух кубитов.

Но после этой процедуры в квантовой цепи появляются новые парные преобразователи С²NOT, которые удаляются, и мы приходим к итоговой упрощенной регулярной структуре (рис. 4) с существенно меньшим числом преобразователей и сниженной глубиной квантовой цепи, что должно уменьшить погрешности при ее более быстром исполнении на квантовом компьютере.



Puc. 4

Наименование квантовой цепи	Начальная подготовка	Первое КПФ	ВМКПФ	Второе КПФ
Базовый вариант для 3 кубитов	OPENQASM 2.0; include "qelib1.inc"; qreg q[5]; creg c[5]; x q[0]; x q[1]; x q[2];	h q[2]; cu1(pi/2) q[1],q[2]; cu1(pi/4) q[0],q[2]; h q[1]; cu1(pi/2) q[0],q[1]; h q[0]; swap q[0],q[2];	_	swap q[0],q[2]; h q[0]; cu1(-pi/2) q[0],q[1]; h q[1]; cu1(-pi/4) q[0],q[2]; cu1(-pi/2) q[1],q[2]; h q[2];
Адаптированный вариант для 3 кубитов с ВМКПФ	OPENQASM 2.0; include "qelib1.inc"; qreg q[5]; creg c[5]; x q[0]; x q[1]; x q[2];	<u>h q[2]:</u> cu1(pi/2) q[1],q[2]: cu1(pi/4) q[0],q[2]: <u>h q[1]:</u> cu1(pi/2) q[0],q[1]: <u>h q[0]:</u> swap q[0],q[2]:	cx q[0],q[2]; cx q[0],q[1]; ccx q[0],q[1],q[2]; cx q[1],q[2];	<u>h q[2];</u> <u>cu1(pi/2) q[1],q[2];</u> <u>cu1(pi/4) q[0],q[2];</u> <u>h q[1];</u> <u>cu1(pi/2) q[0],q[1];</u> <u>h q[0];</u> swap q[0],q[2];
Адаптированный вариант для 4 кубитов с ВМКПФ	OPENQASM 2.0; include "qelib1.inc"; qreg q[5]; creg c[5]; x q[0]; x q[1]; x q[2]; x q[3];	$\frac{h q[3]:}{cu1(pi/2) q[2].q[3]:}$ $\frac{cu1(pi/4) q[1].q[3]:}{cu1(pi/8) q[0].q[3]:}$ $\frac{h q[2]:}{cu1(pi/2) q[1].q[2]:}$ $\frac{cu1(pi/2) q[1].q[2]:}{cu1(pi/4) q[0].q[2]:}$ $\frac{h q[1]:}{cu1(pi/2) q[0].q[1]:}$ $\frac{h q[0]:}{swap q[0].q[3]:}$ $\frac{swap q[1].q[2]:}{swap q[1].q[2]:}$	<pre>swap q[3],q[4]; x q[4]; cx q[0],q[2]; cx q[0],q[1]; ccx q[0],q[1],q[2]; cx q[1],q[2]; x q[0]; x q[1]; x q[2]; ccx q[1],q[2],q[3]; ccx q[0],q[3],q[4]; x q[0]; ccx q[1],q[2],q[3]; x q[1]; x q[2]; swap q[3],q[4];</pre>	$\frac{h q[3];}{cu1(pi/2) q[2],q[3];}$ $\frac{cu1(pi/4) q[1],q[3];}{cu1(pi/8) q[0],q[3];}$ $\frac{h q[2];}{cu1(pi/2) q[1],q[2];}$ $\frac{cu1(pi/2) q[1],q[2];}{cu1(pi/4) q[0],q[2];}$ $\frac{h q[1];}{cu1(pi/2) q[0],q[1];}$ $\frac{h q[0];}{swap q[0],q[3];}$ $\frac{swap q[1],q[2];}{swap q[1],q[2];}$

Рассмотрение такой последовательности шагов позволило заложить в разработанное приложение механизм автоматической генерации структурных фрагментов (см. таблицу) программного кода на OpenQASM для формирования унифицированной схемы для КПФ. С целью сравнения были подготовлены фрагменты кода для последовательного использования друг за другом вариантов КПФ для прямого и обратного преобразований (базовый вариант для 3 кубитов) по схеме ПКПФ \rightarrow ОКПФ, а также автоматически сгенерированы последовательно вы-

.....

.....



страиваемые фрагменты кода по схеме: КПФ (прямое преобразование) \rightarrow ВМКПФ \rightarrow КПФ (прямое преобразование) для адаптированных вариантов для 3 и 4 кубитов. Также формируется фрагмент начальной подготовки для выполнения предварительных установок состояния кубитов – данный пример рассчитан на исполнение на пятикубитовом квантовом компьютере с резервированием 5 кубитов в квантовом регистре с предварительной установкой состояния каждого задействованного кубита в |1> (команда x[i]), которые должны быть воспроизведены на выходе квантовой цепи после выполнения всех квантовых преобразователей. В реализации КПФ на OpenQASM по классической схеме [1] используются необходимые квантовые преобразователи (swap – обмена, h – Адамара, cu1 – управляемого поворота на заданный угол), изображенные на рис. 5, 6 вертикальными линиями с двумя перекрестьями для обмениваемых кубитов и квадратами с символами Н и U1 соответственно. Подготовленные таким образом варианты программного кода могут быть загружены в оболочку IBM Quantum с автоматическим получением графических нотаций:



традиционная схема базового варианта для 3 кубитов представлена на рис. 5, унифицированная схема адаптированного варианта для 3 кубитов – на рис. 6.

Представленные на рис. 5 и 6 квантовые цепи были загружены, верифицированы и выполнены на симуляторе simulator_mps (выполнение матричных расчетов, до 100 кубитов) облачного сервиса IBM Quantum с повтором 4096 раз. На рис. 7–13 представлены скриншоты сервиса IBM Quantum с указанием состояний кубитов (по оси x) и частоты их измерения (по оси y), времени исполнения отдельных операций по обработке квантовой цепи.

Результаты выполнения квантовых цепей представлены: на рис. 7 – по схеме ПКПФ \rightarrow ОКПФ, на рис. 8 – по схеме КПФ (прямое преобразование) \rightarrow ВМКПФ \rightarrow КПФ (прямое преобразование). В обоих вариантах проверка и выполнение на симуляторе сформировали одинаковый результат – во всех 4096 случаях на выходе была воспроизведена исходная последовательность |1> для каждого из трех кубитов. Эксперименты на симуляторе для иных сочетаний состояний на

входе также приводят к 100-процентному появлению ожидаемых состояний на выходе, что показывает правильность расстановки квантовых преобразователей в обоих вариантах и верность математической сути каждой из квантовых цепей.

Экспериментальное исследование представленных на рис. 5 и 6 квантовых цепей осуществлено на квантовом компьютере ibmq santiago c повтором 4096 раз, который имеет линейную последовательность расположения 5 кубитов и обеспечивает использование на физическом уровне унифицированного базового набора преобразователей (поворота на заданный угол, NOT, CNOT, SquareNOT – корень квадратный из NOT). Облачный сервис IBM Quantum обеспечил трансляцию исходной последовательности преобразователей с логического уровня на физический и их загрузку после верификации на выполнение. Результаты выполнения квантовых цепей представлены: на рис. 9 – по схеме ПКП $\Phi \to O$ КП Φ , на рис. 10 – по схеме КПФ (прямое преобразование) \rightarrow ВМКП $\Phi \rightarrow$ КП Φ (прямое преобразование).



Следует отметить следующее: время выполнения квантового алгоритма при использовании ВМКПФ чуть больше, поскольку помимо КПФ в нем присутствуют дополнительные преобразователи с увеличением глубины квантовой цепи и очевидных больших временных затрат на исполнение; частота появления желаемого результата (воспроизведение исходной последовательности



|1> для каждого из трех кубитов) оказалась ниже, что очевидно связано с накоплением погрешностей, влияние которых также сказывается и для классического варианта ПКПФ \rightarrow ОКПФ. Это данность, присутствующая в квантовых компьютерах на современном этапе их развития.

Следующие эксперименты проводились на квантовом компьютере ibmq quito с повтором 4096 раз, который имеет нелинейную последовательность расположения 5 кубитов (есть кубит с более чем двумя соседями) и обеспечивает использование на физическом уровне такого же унифицированного базового набора преобразователей. Облачный сервис IBM Quantum обеспечил трансляцию исходной последовательности преобразователей с логического уровня на физический и их загрузку после верификации на выполнение. При одном запуске на входе присутствовала та же последовательность из |1> для каждого из трех кубитов, результат выполнения (рис. 11) демонстрирует более существенное влияние погрешностей на воспроизводимость исходного состояния на выходе (крайний правый столбик), что может быть связано с нелинейным размещением взаимодействующих кубитов. При другом запуске на входе была последовательность из |0> для каждого из трех кубитов, а результат выполнения (крайний левый столбик на рис. 12) имеет примерно тот же эффект проявления погрешностей.

С помощью разработанного нами приложения был автоматически сгенерирован программный код на OpenQASM (несколько тысяч строк) и для квантовых цепей с десятками кубитов, которые после загрузки в IBM Quantum могли быть верифицированы и исполнены только на симуляторе simulator_mps. Результат проверки воспроизводимости входной последовательности на выходе для выполнения КПФ на 20 кубитах представлен на рис. 13 (общее число используемых кубитов равно 37, а глубина цепи составила несколько тысяч исполняющихся преобразователей при их возможном одновременном расположении). Общий вид ВМКПФ для выполнения КПФ на 17 кубитах представлен на рис. 14 (общее число используемых кубитов: 2 · 17 – 3 = 31). При этом прогон квантовой цепи с существенным числом кубитов и преобразователей на симуляторе также подтвердил 100-процентную воспроизводимость и соответствие правильности автоматической расстановки квантовых преобразователей.

В данный момент научное сообщество и программисты находятся на стремительно развивающемся технологическом этапе опытного создания квантовых компьютеров на разных физических принципах. Постоянно проходят апробацию меняющиеся архитектурные решения по взаимному размещению кубитов на физическом уровне. Единой платформы для архитектуры квантового компьютера пока нет, а скорее всего их так и останется несколько вариантов. Со временем будет обеспечено стабильное продолжительное поддержание состояний кубитов, уменьшатся погрешности. Однако фундаментальные подходы к организации квантовых вычислений, заложенные в XX в., пока остаются неизменными. В любом случае следует ориентироваться на унифицированный базовый набор преобразователей и основные принципы их функционирования. Выход на сотни и тысячи кубитов, очевидно, потребует разработки автоматизированных средств проектирования квантовых цепей на логическом уровне. Предложенный нами подход автоматической генерации спецификаций квантовых цепей, имеющих регулярную структуру, - только один из возможных вариантов. Дальнейшее развитие этого подхода может быть ориентировано на поиск оптимального числа используемых квантовых преобразователей с уменьшением глубины квантовой цепи, а также на учет особенностей перехода с логического уровня описания к физическому в соответствии с предлагаемыми решениями по физическому воплощению кубитов и их фактическому размещению для взаимодействия друг с другом.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Elementary gates for quantum computation / A. Barenco, C. H. Bennett, R. Cleve, D. P. DiVincenzo, N. Margolus, P. Shor, T. Sleator, J. Smolin, H. Weinfurter // Phys. Rev. 1995. № A52. P. 3457–3467. 2. Nielsen M. A., Chuang I. L. Quantum Computation and Quantum Information. Cambridge: Cambridge Univ. Press, 2000. 3. Kane B. A silicon-based nuclear spin quantum computer // Nature. 1998. Vol. 393. P. 133–137.

4. Observation of Entangled States of a Fully Controlled 20-Qubit System / N. Friis, O. Marty, C. Maier, C. Hempel, M. Holzäpfel, P. Jurcevic, M. B. Plenio, M. Huber, C. Roos, R. Blatt, B. Lanyon // Phys. Rev. 2018. X8(021012). URL: https://www.researchgate.net/publication/321417396_Observation_of_Entangled_States_of_a_F ully_Controlled_20-Qubit_System (дата обращения 04.10.2021).

5. Quantum computing with graphene plasmons / I. A. Calafell, J. D. Cox, M. Radonjić, J. R. M. Saavedra, F. J. G. de Abajo, L. A. Rozema, P. Walther // Nature: npj Quantum Information. 2019. Vol. 5, № 1 URL: https://www.researchgate.net/publication/332809568_Q uantum_computing_with_graphene_plasmons (дата обращения 04.10.2021).

6. A Review on Quantum Computing: From Qubits to Front-end Electronics and Cryogenic MOSFET Physics / F. Jazaeri, A. Beckers, A. Tajalli, J. Sallese // Proc. of 26th Int. Conf. Mixed Design of Integrated Circuits and Systems (2019 MIXDES). IEEE, Rzeszow, Poland. 2019. P. 15–25.

7. Vert D., Sirdey R., Louise S. On the limitations of the Chimera graph topology in using analog quantum computers // Proc. of the 16th Conf. on Computing Frontiers (CF'19). April 30–May 2, 2019, Alghero, Italy. ACM, New York, NY, USA. 2019. 4 pages. URL: https://www.researchgate.net/publication/332957168_On_t he_limitations_of_the_chimera_graph_topology_in_using_an alog_quantum_computers (дата обращения 04.10.2021). 8. Quantum supremacy using a programmable superconducting processor / F. Arute, K. Arya, R. Babbush, D. Bacon, et al. // Nature. 2019. Vol. 574. P. 505–510.

9. Алексеев В. Глобальный международный проект свободного доступа к квантовым компьютерам IBM Quantum Experience // Компоненты и технологии. 2018. № 7. С. 96–104.

10. Департамент коммуникаций Госкорпорации «Росатом». В России создана Национальная квантовая лаборатория // Сайт Госкорпорации по атомной энергии «Росатом». 25 Нояб., 2020. 12:46. URL: https://www.rosatom.ru/journalist/news/v-rossii-sozdananatsionalnaya-kvantovaya-laboratoriya/?sphrase_id=224 5266 (дата обращения 04.10.2021).

11. Soeken M., Haener T., Roetteler M. Programming quantum computers using design automation // Proc. of the Design, Automation and Test in Europe (DATE'2018). Dresden, Germany, 2018. P. 10. URL: https://ieeexplore. ieee.org/document/8341993 (дата обращения 04.10.2021).

12. Матвеева И., Калмычков В. А. Рекурсивнолексическая методика расстановки квантовых преобразователей для задач автоматизированного проектирования // Изв. СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2010. № 6. С. 52–57.

13. Matveeva I. V., Dorokhov A. V., Kalmychkov V. A. Lexical analyzer in CAD for Quantum symbolic model of QFT // Proc. of the 19th Int. Conf. on Soft Computing and Measurements (SCM 2016). SPb: Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2016. P. 407–411.

14. Open quantum assembly language. 2017. arXiv preprint arXiv:1707.03429 / A. W. Cross, L. S. Bishop, J. A. Smolin, J. M. Gambetta // URL: https://arxiv.org/ abs/1707.03429 (дата обращения 04.10.2021).

V. A. Kalmychkov, I. V. Matveeva Saint Petersburg Electrotechnical University

COMPUTER-AIDED DESIGN OF QUANTUM CIRCUITS WITH A REGULAR STRUCTURE ON THE EXAMPLE OF A PERMUTATION MODULE FOR QFT

We present our proposed approach to the automatic generation of quantum circuit specifications at the logical level of quantum gates mapping schemes for tasks whose solution can be described at the mathematical level using recursive schemes. The ways of reducing the number of quantum gates and the depth of the quantum circuit are indicated based on the allocation of parts with quantum gates from the C^kNOT family having a regular structure. A variant of the implementation of an auxiliary module for the permutation of conjugate coefficients in the unification of the quantum Fourier transform for performing the inverse transformation using an auxiliary module is proposed. The scheme of adaptation of a multi-qubit gate from the logical level of description to the basic gates of the physical level is indicated. A method of fixing the specification of a quantum circuit in the form of a program code in the OpenQASM language with a limited set of gates is chosen. The results of tests of the quantum circuits specifications obtained in automatic mode when using the IBM Quantum cloud service with different systems (simulator and quantum computers with 5 qubits) are presented.

Quantum Fourier transform (QFT), qubits, quantum gates, quantum circuit