

(19)



**Евразийское
патентное
ведомство**

(21) **202191416** (13) **A1**

(12) **ОПИСАНИЕ ИЗОБРЕТЕНИЯ К ЕВРАЗИЙСКОЙ ЗАЯВКЕ**

(43) Дата публикации заявки
2021.08.23

(51) Int. Cl. *G06N 10/00* (2019.01)
G06N 99/00 (2019.01)

(22) Дата подачи заявки
2019.11.19

(54) **СИСТЕМЫ И СПОСОБЫ, ВКЛЮЧАЮЩИЕ В СЕБЯ ГИБРИДНЫЕ КВАНТОВЫЕ МАШИНЫ, АСПЕКТЫ КВАНТОВОЙ ИНФОРМАЦИОННОЙ ТЕХНОЛОГИИ И/ИЛИ ДРУГИЕ ОСОБЕННОСТИ**

(31) 62/769,455

(72) Изобретатель:

(32) 2018.11.19

Гезек Георг (US)

(33) US

(86) PCT/US2019/062299

(74) Представитель:

(87) WO 2020/106777 2020.05.28

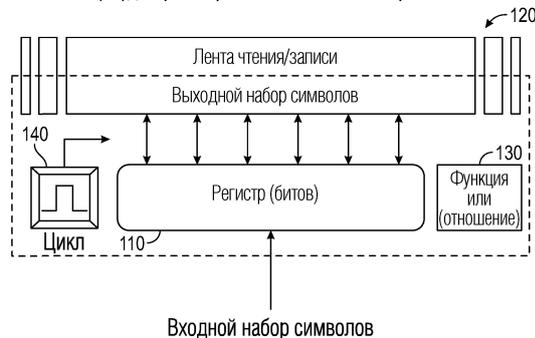
Медведев В.Н. (RU)

(71) Заявитель:

КБЮЭМВЭАР АГ (CH)

(57) Раскрыты системы и способы, включающие квантовые машины, гибридные квантовые машины, аспекты квантовой информационной технологии и/или другие особенности. В одной примерной реализации предлагается система, содержащая квантовый регистр, который хранит квантовую информацию с использованием кубитов, выполненных с возможностью хранения квантовой информации с использованием частиц или объектов, организованных в решетку квантовых вентиляей, часы, которые обеспечивают тактовый цикл для квантового регистра, и компонент вычисления связи кубитов, связанный с квантовым регистром, в котором компонент вычисления связи кубитов выполнен с возможностью сдвига квантовой информации между кубитами, причем система хранит кубиты в различных состояниях с использованием физических качеств, которые могут определять кубиты, выполненные с возможностью быть запутанными и суперпозиционированными в одно и то же время. Кроме того, квантовый регистр может содержать компонент запутанности, и/или компонент вычисления связи кубитов может содержать компонент суперпозиции.

(не)детерминированная машина Тьюринга



202191416
A1

202191416
A1

ОПИСАНИЕ ИЗОБРЕТЕНИЯ

2420-569045EA/32

СИСТЕМЫ И СПОСОБЫ, ВКЛЮЧАЮЩИЕ В СЕБЯ ГИБРИДНЫЕ КВАНТОВЫЕ МАШИНЫ, АСПЕКТЫ КВАНТОВОЙ ИНФОРМАЦИОННОЙ ТЕХНОЛОГИИ И/ИЛИ ДРУГИЕ ОСОБЕННОСТИ

ПЕРЕКРЕСТНАЯ ССЫЛКА НА РОДСТВЕННУЮ ЗАЯВКУ

Настоящая заявка испрашивает приоритет предварительной патентной заявки США № 62/769455, поданной 19 ноября 2018 г., раскрытие которой включено в настоящий документ посредством ссылки во всей ее полноте.

УРОВЕНЬ ТЕХНИКИ

ОБЛАСТЬ ТЕХНИКИ, К КОТОРОЙ ОТНОСИТСЯ ИЗОБРЕТЕНИЕ

Раскрытая технология относится к области (областям) информатики, квантовой теории информации, квантовой физики, компьютерной архитектуры, квантовых обрабатывающих и/или запоминающих компонентов с их физической структурой.

ОПИСАНИЕ ПРЕДШЕСТВУЮЩЕГО УРОВНЯ ТЕХНИКИ

Наши обычные компьютеры основаны на теории вычислений, разработанной в основном Аланом Тьюрингом, и различных архитектурных концепциях, таких как концепция Джона фон Неймана. Таким образом, современные компьютеры, используемые для многих приложений в промышленности и коммерческих продуктах, представляют собой так называемые машины Тьюринга, которые в основном преобразуют набор входных состояний, называемых данными, в набор выходных состояний, которые также являются данными, которые также называются «результатом» или «решением» проблемы. Промежуточное вычисление, которое производит это преобразование данных, называется алгоритмом, поскольку машина Тьюринга способна последовательно выполнять только математические функции, которые жестко встроены в арифметико-логическое устройство (ALU) центрального процессора. Сама программа состоит из набора так называемых машинных кодов, которые просто выбирают функции ALU одну за другой. В такой программе для машины Тьюринга можно закодировать математическую задачу, и если машина Тьюринга остановит выполнение после конечного числа шагов, проблема будет решена конечным результатом, который является другим набором данных.

Все машины Тьюринга (такая как примерная машина, показанная на Фиг. 1) имеют общее то, что они могут быть физически построены с помощью классической механики. Таким образом, машины Тьюринга очень предсказуемы, теоретически детерминированы, что выражается в том факте, что определенный набор входных данных будет каждый раз приводить к одному и тому же набору выходных данных, независимо от того, как часто выполняется программа. Машина Тьюринга также ограничена в своих возможностях только последовательным выполнением одного шага программы за другим. Можно запустить одновременно большее количество машин Тьюринга, но как только дело доходит до взаимодействия между ними посредством обмена данными, одна машина Тьюринга должна ожидать результата другой.

Все эти последствия приводят к классу проблем «P», который представляет все проблемы, которые могут быть закодированы в программу на машине Тьюринга, которая остановится через время, пропорциональное полиномиальной функции от размера входных данных. В большинстве случаев проблемы, относящиеся к классу P, могут быть решены современной машиной Тьюринга за разумный промежуток времени. Но есть много известных проблем, для которых мы не знаем программы, способной решить их за полиномиальное время, и время их решения является экспоненциальной функцией размера ввода. Таким образом, решения таких проблем очень скоро превзойдут возможности любой машины Тьюринга за счет увеличения размера входных данных.

Фундаментальным решением этой проблемы являются новые типы вычислительных машин, такие как нейронные сети или квантовые компьютеры. Нейронные сети можно понимать как массивные параллельные вычислительные структуры с огромным количеством логических вентилях, которые сильно взаимосвязаны. Таким образом, их нельзя запрограммировать с помощью явных алгоритмов, но они обучаются на примерах, и в результате вся нейронная сеть сама становится огромным алгоритмом, решающим проблему в глобальном масштабе, который больше не может быть полностью формализован из-за своей сложности. Естественной реализацией нейронных сетей являются нейронные сети, подобные человеческому мозгу.

Квантовые компьютеры представляют собой совершенно другой подход к преодолению фундаментальных вычислительных ограничений машин Тьюринга, и основываются уже не на классической детерминированной механике, а непосредственно на квантовой механике. Хотя некоторые теоретические концепции таких машин были предложены и/или известны в течение приблизительно 20 лет, некоторые важные достижения, которые описываются ниже, все еще отсутствовали для коммерчески успешной реализации квантового компьютера.

Другим важным моментом здесь является то, что из-за фундаментального различия квантовых и классических алгоритмов программное обеспечение, написанное для машины Тьюринга, не может работать на квантовой машине, и наоборот. Однако прямая коммерческая стоимость установленного программного обеспечения для машин Тьюринга, наших сегодняшних компьютеров, превышает триллион долларов США, и косвенно большая часть всех предприятий в промышленно развитых странах зависит от этого программного обеспечения для машин Тьюринга. Нельзя ожидать успешного выхода на рынок чисто квантовой машины, где все программное обеспечение должно быть воспроизведено перед использованием, в то время как даже потенциально более медленные машины Тьюринга все еще отлично работают с хорошо известными детерминированными алгоритмами. Соответственно, гибридный квантовый компьютер, способный работать как с квантовыми, так и с последовательными детерминированными алгоритмами (например, как изложено ниже), является весьма желательным, если не необходимым в различных случаях.

КРАТКОЕ ОПИСАНИЕ ЧЕРТЕЖЕЙ

Различные варианты осуществления настоящего изобретения могут быть дополнительно объяснены со ссылкой на прилагаемые чертежи, на которых одинаковые структуры отмечены одинаковыми ссылочными цифрами. Показанные чертежи не обязаны масштабироваться; вместо этого акцент делается на иллюстрировании принципов настоящего изобретения. Следовательно, конкретные структурные и функциональные детали, раскрытые в настоящем документе, не должны интерпретироваться как ограничивающие, и являются лишь представительной основой для обучения специалистов в данной области техники разнообразным использованиям одного или более иллюстративных вариантов осуществления.

Фиг. 1 представляет собой блок-схему известной машины Тьюринга.

Фиг. 2 представляет собой блок-схему примерной универсальной квантовой машины, согласующейся с примерными аспектами некоторых вариантов осуществления настоящего изобретения.

Фиг. 3 представляет собой блок-схему примерного гибридного квантового компьютера, согласующегося с примерными аспектами некоторых вариантов осуществления настоящего изобретения.

Фиг. 4 представляет собой блок-схему примерного гибридного квантового процессора, согласующегося с примерными аспектами некоторых вариантов осуществления настоящего изобретения.

ПОДРОБНОЕ ОПИСАНИЕ ИЛЛЮСТРАТИВНЫХ ВАРИАНТОВ ОСУЩЕСТВЛЕНИЯ

Как было указано выше, хотя некоторые теоретические концепции таких машин уже были предложены и/или известны в отношении квантовых компьютеров, некоторые важные достижения все еще отсутствовали для успешной коммерческой реализации квантового компьютера. Во-первых, например, отсутствовала модель универсальной квантовой машины, определяющая технические решения существующих технических проблем квантового аналога вычислительного класса машин Тьюринга и их связь с классами вычислительной сложности. Во-вторых, также отсутствовала физическая реализация гибридного квантового компьютера, также имеющая технические решения существующих технических проблем когерентности кэша между различными типами блоков обработки, при сохранении высокой пропускной способности обмена данными между ними, что необходимо для достижения квантовой обработки информации на практике. Технические решения, касающиеся обеих этих инноваций, описываются ниже, в Разделе 1 и Разделах 2-3, соответственно.

1. Обзор технологий универсальной квантовой машины

В то время как класс задач, которые могут быть решены машиной Тьюринга за полиномиальное время, называется P , класс задач, которые могут быть решены универсальной квантовой машиной за полиномиальное время, может быть назван QP . Существует также теоретическое расширение класса P за счет добавления стохастического источника к машине Тьюринга, так что она также способна генерировать

истинное случайное число, что приводит к классу проблем, которые могут быть решены с помощью такой недетерминированной машины Тьюринга за полиномиальное время, называемому NP. Следует иметь в виду, что окончательной теории классов сложности еще нет, так как нам не удалось решить, справедливо ли выражение $P < \text{или} = NP$ и $NP < \text{или} = QP$. Кроме того, мы еще не можем полностью отличить универсальную квантовую машину, по определению способную вычислять все возможные квантовые алгоритмы за минимально возможное время вычислений, от квантовой машины с ограничениями. Тем не менее, теория квантовой информации содержит информацию, относящуюся к этой проблеме, и квантовый компьютер, такой как описанный в настоящем документе, поможет нам уточнить эти тонкие различия.

Раскрываемая технология может использовать и/или включать следующие примерные аспекты или схему общей модели, справедливой для любой универсальной квантовой машины, как показано на Фиг. 2. Кроме того, аспекты в настоящем документе основаны на принципе/понимании того, что во вселенной нет никаких других истинных стохастических источников, кроме квантовых эффектов, то есть квантовых алгоритмов. Принимая это во внимание, теоретическое расширение детерминированной машины Тьюринга за счет стохастического источника в конечном итоге приводит к квантовой машине с ограничениями. С другой стороны, детерминированный процесс по определению никогда не может создать истинный стохастический источник. Это приводит к выводу, что P должно быть $< NP$, поскольку задача получения истинного случайного числа никогда не остановится на детерминированной машине Тьюринга, но может быть легко решена с помощью недетерминированной машины Тьюринга. Поскольку NP в этом смысле является подмножеством QP, считается, что $QP > NP > P$.

Ссылаясь на Фиг. 1 и 2, сравнение архитектур машины Тьюринга и раскрытой универсальной квантовой машины объясняется следующим образом. Как показано на Фиг. 1, такая Машина Тьюринга может включать в себя регистр 110 обычных битов, которые могут напрямую поступать из внешнего источника символов (входного набора символов), а затем интерпретироваться машиной как программные инструкции или данные. Язык является довольно простым, есть команды для перемещения диапазона памяти 120 (ленты чтения/записи), соединенного с регистром, а также команды для записи или чтения символов в этом диапазоне. Отдельные позиции на ленте четко определены с компьютерной точки зрения, т.е. такие позиции являются «адресуемыми». Каждый шаг процесса компьютерной программы отделяется во времени от другого посредством часов 140 (цикла).

Помимо программных команд для перемещения, чтения и записи ленты в произвольных положениях, арифметико-логический блок 130 (ALU) машины Тьюринга может реализовывать все необходимые математические функции для выполнения всех видов операций. Более сложные функции можно разделить на набор более простых функций. Этим так называемая детерминированная машина Тьюринга отличается от недетерминированной. В то время как детерминированная машина Тьюринга имеет

только доступные функции, которые могут производить только один конкретный результат из определенного входа, недетерминированная машина Тьюринга также имеет возможность отношения, которое способно создавать несколько версий выходных данных только из одного набора ввода. Выбранная версия возможных результатов является чисто случайной и определяется непредсказуемым, стохастическим источником. Таким образом, так называемая недетерминированная машина Тьюринга (NDTM) не является противоположностью ее детерминированного (DTM) варианта, но должна пониматься как его относительное расширение.

Возвращаясь к раскрытой технологии, инновации в данном документе могут включать и/или использовать систему (системы)/реализацию (реализации), показанные на Фиг. 2, которые достигают архетипа универсальной квантовой машины, и которые способны выполнять как квантовые, так и последовательно детерминированные операции, а также недетерминированные алгоритмы.

Выглядящая снаружи как черный ящик, примерная универсальная квантовая машина (UQM), проиллюстрированная на Фиг. 2, работает аналогично недетерминированной машине Тьюринга (NDTM), которая также допускает неоднозначные отношения. Следовательно, из одного и того же набора входных данных могут быть получены разные наборы выходных данных, что делает результат универсальной квантовой машины частично непредсказуемым. Между наборами ввода и вывода находится алгоритм, который включает в себя квантовые отношения.

Что касается различий между универсальной квантовой машиной и машиной Тьюринга, квантовая информация, хранящаяся в квантовом регистре 210 (верхняя область на чертеже), не может быть скопирована из-за требования неклонирования, налагаемого квантовой механикой, в отличие от классической информации. Это обстоит так, потому что взаимодействие с квантовой машиной необходимо для того, чтобы сделать ввод, который приведет к аннулированию, удалению или уничтожению квантовой информации внутри регистра. Однако квантовый регистр просто хранит квантовые состояния, которые могут быть разрушены такой попыткой.

Следовательно, раскрытая здесь квантовая машина использует классическую ленту 230 чтения-записи не только для вывода результата вычисления, но также и для возврата значений, хранящихся в регистре, и для включения входных данных. Для того, чтобы вообще выполнять квантовые алгоритмы, сначала используется подходящий физический процесс «инициализации» для переноса этих классических и, следовательно, детерминированных наборов данных в квантовые состояния 260, которые здесь называются кубитами. Эти кубиты хранятся на ленте 220 кубитов, которая на Фиг. 2 обозначена как «QBIT-TIE». Таким образом, классические биты становятся суперпозиционированными (полученными суперпозицией) кубитами, которые могут быть непосредственно прочитаны, записаны и обработаны квантовым регистром. Работа здесь аналогична машине Тьюринга, но вместо классических алгоритмов вступают в действие квантовые алгоритмы 270, и вместо данных, хранящихся в классических битах,

информация находится в кубитах. Квантовый регистр способен запутывать кубиты, а связь кубитов обеспечивает их суперпозицию. Как показано в примерной реализации на Фиг. 2, такая запутанность может быть обеспечена посредством компонента 212 запутывания внутри квантового регистра 210, и такая суперпозиция может быть обеспечена посредством компонента 222 суперпозиции внутри компонента 220 вычисления связи кубитов.

Здесь следует отметить, что хотя выражение «лента» используется в настоящем документе по историческим причинам, например как термин уровня техники, такие носители данных могут включать в себя одну или несколько из любых технологий памяти помимо традиционных ленточных (например, магнитных) хранилищ.

Для того, чтобы выдать результат вычислений с помощью настоящей квантовой машины, недостаточно просто прочитать вывод с ленты чтения-записи, но заранее должен быть выполнен процесс, обратный инициализации, а именно измерение 250 кубитов, как представлено символами прибора на Фиг. 2. Это измерение включает в себя стохастический эффект наложенных состояний, которые возникают в кубите, в соответствии с внутренними вероятностями, которые, в свою очередь, являются результатом ранее установленных квантовых вентилях в регистре и приводят к частично детерминированным и случайным, классическим выходным величинам, называемым выходными битами. Эти выходные биты записываются одинаково (например, посредством таких ранее установленных квантовых вентилях), например, машиной Тьюринга на классической ленте памяти 230, и доступны либо как результат, либо в качестве классического кэша для алгоритма универсальной квантовой машины. Таким образом, очевидно, что раскрытая здесь универсальная квантовая машина способна выполнять как классические, так и квантовые алгоритмы, что позволяет ей эмулировать всю машину Тьюринга. Действительно, большинство известных квантовых алгоритмов, таких как алгоритм Шора, используют как классические, так и квантовые функции, которые компонуется поочередно.

Как можно видеть, раскрытая квантовая машина является универсальной, даже в предположении, что все существующие квантовые отношения не были открыты: во-первых, все наши физические модели, которые описывают естественные квантовые системы во вселенной, являются просто состоящими из суперпозиции и запутанности. Во-вторых, работа авторов настоящего изобретения в квантовой информационной технологии (QIT) [см., например, публикацию *Theory of Quantum Information as the Theory of Everything*, Georg Geseck, 2009-2012, которая включена в настоящий документ посредством ссылки] с помощью своей фундаментальной теории графов демонстрирует, что все возможные структуры информации, хранящейся во Вселенной, полностью описываются суперпозицией и запутанностью. Следовательно, универсальный характер архитектуры, показанной на Фиг. 2, то есть универсальной квантовой машины, может быть определен и установлен в этом контексте.

2. Физическая реализация (реализации) гибридного квантового компьютера

Для того, чтобы достичь и описать реализацию универсального квантового компьютера полным и разумно сжатым способом, раскрытая технология объясняется на основе существующих машин Тьюринга, также называемых серверами, и, кроме того, строительных блоков квантовой части, которая реализуется в квантовом процессоре 360, как показано на Фиг. 3.

Фиг. 3 представляет собой блок-схему примерного гибридного квантового компьютера 300, согласующегося с примерными аспектами некоторых вариантов осуществления настоящего изобретения. Как показано на Фиг. 3, системные элементы, включая пре- и постпроцессинговые блоки 330, например процессор Тьюринга, такой как серверы Quanton™ компании Novarion, могут быть использованы для обеспечения классической части универсальной квантовой машины, ленты записи-чтения, которая реализуется как так называемая шина 340 PCI-express или PCIe, как показано на Фиг. 3, которая опять же иллюстрирует высокоуровневую примерную блок-схему гибридного квантового компьютера.

Для добавления квантовых вычислительных частей с помощью промышленных средств реализации в настоящем документе могут включать такие квантовые вычислительные части в квантовый обрабатывающий блок или QPU 360. Для того, чтобы объединить классическую и квантовую части гибридного квантового компьютера в соответствии с эксплуатационными потребностями, то есть так, чтобы они могли беспрепятственно соединяться и взаимодействовать с высокой производительностью, классический и квантовый процессоры организуются в ориентированную на обработку данных в памяти (memory-centric) вычислительную архитектуру, включающую систему 320 хранения в памяти, как показано в примерной системе на Фиг. 3. В некоторых реализациях такая система хранения в памяти может быть реализована посредством PlatinStor™ Storage Systems компании Novarion. Обычно такая система 320 хранения в памяти может содержать банки энергонезависимой памяти, выполненные с возможностью прямой одновременной адресации шиной PCIe, как от пре- и постпроцессинговых блоков 330, так и от платформы 310 гибридного квантового процессора. Для того, чтобы не скомпрометировать данные во время передачи, ключевой особенностью такой системы 320 хранения в памяти является встроенная когерентность кэша, которая подтверждает запись только тогда, когда данные были физически записаны и доступны для физических операций чтения другого устройства. Таким образом, эта система 320 хранения в памяти была разработана специально для поддержки требуемой ориентированной на обработку данных в памяти вычислительной платформы, которая является ключом к общей функциональности гибридного квантового компьютера, представленного в настоящем документе.

Варианты осуществления иллюстративной архитектуры, показанной на Фиг. 3 для гибридного квантового компьютера, могут использовать существующую промышленную технологию, такую как различные виды пре- и постпроцессинговых блоков 330 или процессоры Тьюринга (такие как, например, процессор Quanton™ компании Novarion),

система 320 хранения в памяти (например, банки энергонезависимой памяти, такие как упомянутый выше PlatinStor™) и шина PCIe 340 для соединения этих строительных блоков. Как показано на Фиг. 3, пре- и постпроцессинговые блоки 330 или процессоры Тьюринга могут содержать обычные компоненты, показанные на Фиг. 1. Кроме того, в некоторых вариантах осуществления пре- и постпроцессинговые блоки 330 или процессоры Тьюринга могут конфигурироваться, как Quanton™, для использования всех различных видов классических обрабатывающих блоков, в частности по меньшей мере, хотя и не исключительно, центральных процессоров (CPU), матричных процессоров (MPU), графических процессоров (GPU) или даже нейронных сетей. Каждый вид XPU обязан использовать встроенный контроллер памяти внутри пре- и постпроцессинговых блоков 330, которые предоставляют компонентам XPU доступ к централизованной архитектуре памяти, обеспечиваемой системой 320 хранения в памяти посредством шины PCIe.

Кроме того, следует отметить, что в то время как некоторые существующие субкомпоненты ориентированной на обработку данных в памяти вычислительной платформы были разработаны отраслью, аспекты настоящих систем и способов могут включать инновации, возникающие в зависимости от программного и аппаратного обеспечения вокруг шины PCIe, например при реализации когерентного потока данных кэша между разнородными процессорами (XPU, QPU) посредством ориентированной на обработку данных в памяти архитектуры. В дополнение к этому следует отметить, что как пре- и постпроцессинговые блоки 330 (такие как Quanton™ Server System) и система 320 хранения в памяти (такая как PlatinStor™) уже были разработаны компанией Novation для соответствующего применения.

Гибридный квантовый процессор 310, согласующийся с настоящими инновациями, также упоминаемый как вычислительная платформа IONICS, является одним из направлений описываемых изобретений и может быть соединен с ориентированной на обработку данных в памяти вычислительной архитектурой посредством шины PCIe 340, как показано на Фиг. 3. Гибридный квантовый процессор 300 включает в себя множество квантовых процессоров, которые соединяются новым фотонным квантовым информационным интерфейсом (PQI) 350. Одним из инновационных компонентов гибридного квантового процессора является ядро 360 квантового процессора, которое функционирует, как показано на Фиг. 2, и может быть создано, как показано на Фиг. 4.

Фиг. 4 представляет собой блок-схему примерного гибридного квантового процессора 400, согласующегося с примерными аспектами некоторых вариантов осуществления настоящего изобретения. Как показано на Фиг. 4, раскрытая архитектура отделяет классическую вычислительную часть от квантовой машины - квантовых вентиляей, которые представляют собой арифметико-логический блок (ALU) 430, построенный на кубитах - но соединяет их с помощью относительно высокопроизводительной и масштабируемой шинной системы, которая основана на промышленных стандартах (PCIe). Раскрытый гибридный квантовый процессор 400

может быть установлен на печатной плате (PCB) - материнской плате - и состоит из контроллера 410 шины (BCU), который реализуется как интегральная схема (IC - FPGA), блока 450 создания вентиля (GCRU), который преобразует электронные сигналы из BCU в параметр для ALU 430 для суперпозиции и запутывания кубитов.

Гибридный квантовый процессор, раскрытый в настоящем документе, такой как процессор, показанный на Фиг. 4, имеет важное архитектурное отличие от любой другой известной реализации кубита, поскольку блок 450 создания вентиля и блок 460 управления вентилем отделяют контроллер 410 шины от квантового регистра, и таким образом представляют кубитную связь 220 между классическим контроллером шины и квантовым регистром 430, который содержит квантовые вентили. Дополнительно к этому, блок 460 управления вентилем (GCU) выполняет манипуляции над кубитами, которые делают их невосприимчивыми к помехам, которые в противном случае вызывают ошибки во время выполнения квантовых информационных транзакций в квантовых вентилях 430. Эти функции управления кубитами представляют собой операторы с коррекцией ошибок, которые могут быть реализованы как современные алгоритмы и запрограммированы контроллером шины в качестве обновления прошивки, например, в существующей установке гибридного квантового компьютера, работающего в дата-центре.

Инициализация 420 кубита создает набор кубитов, количество которых не превышает количество кубитов, которыми обладает квантовый ALU 430, и доставляет квантовую информацию на вход квантовых вентилях 430. Результат обработки квантовой информации будет извлекаться блоками 440 измерения кубитов справа от квантового ALU (Q-ALU). Результаты измерений передаются контроллеру 410 шины (BCU), где они находят классическую кэш-память для дальнейшей передачи посредством шины PCIe в классическую ориентированную на обработку данных в памяти вычислительную архитектуру и присоединенные к ней классические процессоры. Квантовый процессор синхронизируется часами 470 (цикл), что позволяет производить, обрабатывать и измерять большое количество суперпозиционированных и запутанных кубитов в единицу времени. Таким образом, вычислительная мощность гибридного квантового процессора хорошо масштабируется как по количеству запутанных и суперпозиционированных кубитов, так и по количеству квантовых вычислений в секунду.

Q-ALU (блок 430 арифметики и логики кубитов), раскрытый в настоящем документе, допускает все возможные запутанные и суперпозиционные состояния кубитов. Кубиты содержат квантовую информацию и одновременно определяют решетку квантовых вентилях. С учетом этого реализации в настоящем документе включают в себя представление внутри Q-ALU всех возможных квантовых состояний и функций. Таким образом, настоящий гибридный квантовый процессор на самом деле является универсальной квантовой машиной, как это определено в положениях Раздела 1.

Сам блок управления представляет собой машину Тьюринга и, следовательно, способен передавать классическую информацию в Q-ALU через блок управления вентилями. Эта особенность может использоваться для мгновенного исправления ошибок,

и, кроме того, настоящий квантовый процессор может автономно выполнять целые наборы квантовых алгоритмов и возвращать результаты классическому процессору на сервере. Системы и способы, описываемые в настоящем документе, позволяют эффективно использовать пропускную способность PCIe и избегать задержек на шине PCIe.

Поскольку система PCIe в настоящем документе является шинной системой, реализации, описываемые в настоящем документе, могут соединять более одного квантового процессора этого типа с несколькими различными обычными процессорами внутри серверов. Кроме того, может быть реализована интеграция всех описанных частей на одном микрочипе, так, чтобы иметь высокоскоростное соединение между квантовой и классической вычислительными частями. При такой интеграции это решение полезно не только для серверов в центрах обработки данных, как описано в качестве примера в настоящем документе, но также и для персональных компьютеров, смартфонов и встроенных систем в автомобилях, самолетах и т.д.

3. Технические характеристики/аспекты реализации гибридного квантового процессора

Существующие открытия изобретателя в квантовой теории информации объясняют, как квантовую информационную систему (QIS) можно использовать в качестве квантового компьютера. Далее впервые описывается, при каких условиях квантовая информационная система (QIS) реализуется и используется как высокопроизводительный квантовый компьютер, принципы которого являются частью настоящего изобретения. Понятия, написанные заглавными буквами, представляют собой известные понятия:

1. ДЕКОГЕРИРОВАНИЕ и принцип изоляции:

QIS, используемая в настоящем документе, является автономной таким образом, что другие объекты Вселенной, кроме блока инициализации кубита, блока создания вентилях, блока управления вентилями и системы измерения кубитов, не могут влиять на Q-ALU квантового процессора или взаимодействовать с ним.

2. НАДЕЖНОСТЬ и принцип ограничения:

в соответствии с физической реализацией в настоящем документе элементы (частицы) QIS, которые несут квантовую информацию - кубиты в Q-ALU - используемые для вычислений, обеспечивают физические качества, которые могут быть подвергнуты суперпозиции и запутаны одновременно. Поскольку сами частицы состоят из квантовой информации, согласно теории квантовой информации они могут подвергаться суперпозиции и запутываться сами по себе. Таким образом, физическая реализация кубитов сделана таким образом, чтобы степени свободы всей QIS были максимально ограничены кубитными операциями с выбранными физическими параметрами. Это ограничивает возможные ошибки во время квантовых вычислений, что жизненно важно для успеха такой реализации.

3. СЛОЖНОСТЬ и принцип многообразия (Manifold):

Хотя теоретики предпочитают, чтобы QIS описывалась с помощью хорошо известных высокофункциональных теорий, всеобъемлющая сила настоящего блока квантовой арифметики и логики раскрывается многообразием различных путей суперпозиции и запутанности. Это означает, что современные возможности расширенных квантовых вычислений не могут быть обработаны явным теоретическим формализмом, а могут быть реализованы на структурном уровне, таком как описание функциональности нейронной сети. Таким образом, программирование гибридного квантового компьютера, раскрытого в настоящем документе, осуществляется не путем определения алгоритмов разработчиком программного обеспечения, а скорее математиком, «разработчиком квантовых вентилях», строящим структуры для квантового арифметико-логического устройства, которые затем могут быть автономно и заново введены на любом следующем этапе вычислений квантовым процессором, раскрытым выше в настоящем документе. Используя этот принцип многообразия в квантовых вентилях, настоящая квантовая машина представляет собой объект виртуализации оборудования, где аппаратное и программное обеспечение вместе могут изменяться в зависимости от приложения.

В соответствии с теорией квантовой информации автора настоящего изобретения было введено новое понимание явлений запутанности и суперпозиции:

Запутанность изобретатель описывает как совместное использование некоторой квантовой информации между различными объектами (=QIS) во вселенной. Следовательно, можно использовать любой физический процесс для запутывания кубитов, который изменяет их состояния, даже если это изменение выполняется независимо на всех соответствующих сторонах, таких как кубиты в универсальном квантовом компьютере.

Суперпозицию изобретатель описывает как наложение различных частей квантовой информации на один объект (=QIS) во вселенной. Следовательно, различные квантовые вентили могут быть построены с использованием одних и тех же кубитов одновременно в универсальном квантовом компьютере.

4. Физические строительные блоки для кубитов

В соответствии с принципами, изложенными в Разделе 3 для физических систем, используемых в настоящем Q-ALU, а именно изоляции, ограничения и многообразия, различными явными примерами возможных физических объектов в качестве строительных блоков для кубитов являются следующие:

Фотоны и электроны

Одной из самых точных теорий, которых когда-либо достигали люди, является теория квантовой электродинамики (КЭД, QED), которая описывает взаимодействия между фотонами и электронами. Причина этого заключается в том, что обе частицы, согласно вышеупомянутой QIT, представляют собой простейшие компоненты вселенной, что играет нам на руку вторым принципом: ограничением. Эти частицы легко получить и их легко измерить. Интересно, что при первых попытках реализовать блок квантовой обработки с кубитами в качестве носителей кубитов были выбраны не эти простые в

обращении электроны, а гораздо более сложные сверхпроводящие квантовые схемы на кристалле, который необходимо охлаждать до абсолютного нуля для того, чтобы более или менее поддерживать время декогеренции кубитов, с которым можно было бы работать. Кроме того, второй принцип также очень трудно реализовать с помощью прототипов Q-ALU от IBM, Google и D-Wave, поскольку близкие к макроскопическим элементы интегральных схем просто имеют слишком много степеней свободы. Поэтому значительные усилия этих компаний по созданию практически полезного блока квантовой обработки пока не увенчались успехом.

В соответствии с реализациями, описанными в настоящем документе, раскрывается физическая реализация такого квантового арифметического и логического блока в соответствии с тремя данными принципами с помощью частиц, таких как электроны, простые ионы, такие как Li^+ , Be^+ , H^+ , He^+ , или просто протонами, которые удерживаются в силовом поле магнитного или электрического характера без какой-либо другой связи со средой, но адресуются фотонами, электронами и простыми частицами и квазичастицами.

Протоны в соответствии с вышеупомянутой QIT являются третьей самой простой частицей во вселенной, и таким образом выполняют требование надежности 2-го принципа. Таким образом, реализации в настоящем документе могут использовать спин протона в качестве свойства для хранения квантовой информации кубита. Это также справедливо для простых электронов. Для того, чтобы выполнить 3-ий принцип сложности с этими очень простыми частицами, раскрывается создание спиновых систем на основе множества эталонов с помощью сложных магнитных полей (тогда спины могут быть направлены не только вверх и вниз, но и могут иметь множество наложенных друг на друга направлений). Магнитными полями легко управлять внутри интегральной схемы, даже при комнатной температуре, и они являются достаточно сильными на микроскопических расстояниях. В вышеупомянутой QIT показано, что с помощью этих магнитных полей аспекты раскрытой технологии устанавливают множество суперпозиционных и запутанных состояний на этих простых и чистых кубитах. Таким образом, кубиты намного лучше соответствуют этим трем принципам.

Кроме того, показано, что эти эффекты достигаются с помощью электронов в высокотемпературных сверхпроводящих материалах, что позволяет легко охлаждать их жидким азотом вместо сверхмощного криооборудования, необходимого в существующих решениях.

Кроме того, в соответствии с определениями запутанности и суперпозиции в Разделе 3, создание вентиля и управление им в существующем Q-ALU 430 осуществляется с помощью других квантовых объектов, таких как фотоны и квазичастицы, поступающих снаружи Q-ALU. Это позволяет существующему блоку управления вентилем обнулять квантовые состояния и исправлять ошибки во время квантовых вычислений.

5. Платформа гибридного квантового процессора

Описываемая теоретическая конструкция, называемая универсальной квантовой

машиной и показанная на Фиг. 2, и блок-схема гибридного квантового процессора, показанная на Фиг. 4, представляют первую универсальную архитектуру, имеющую практическую и фактическую реализацию для любого квантового компьютера. Поскольку структура квантовых вентилях может быть реализована как арифметические и логические функции в Q-ALU 430, сохранена в блоке 450 создания вентилях, выбрана контроллером 410 шины и должным образом передана на исполнение блоком 460 управления вентилях, единый набор структур квантовых вентилях будет достигнут с помощью раскрытой универсальной квантовой вычислительной системы, которая упоминается здесь как гибридный квантовый процессор, а также связанных с ним систем и платформ.

Как раскрыто в настоящем документе, реализации и особенности настоящего изобретения могут быть реализованы с помощью компьютерного аппаратного оборудования, программного обеспечения и/или встроенного программного обеспечения. Например, системы и способы, раскрытые в настоящем документе, могут быть воплощены в различных формах, включая, например, один или более процессоров, таких как компьютер (компьютеры), сервер (серверы) и т.п., и могут также включать в себя или использовать по меньшей мере одно из базы данных, цифровой электронной схемы, встроенного микропрограммного обеспечения, программного обеспечения или их комбинаций. Кроме того, в то время как некоторые из раскрытых реализаций описывают конкретные (например аппаратные средства и т.д.) компоненты, системы и способы, согласующиеся с инновациями, описанными в настоящем документе, могут быть реализованы с помощью любой комбинации аппаратных средств, программного обеспечения и/или встроенного микропрограммного обеспечения. Кроме того, вышеотмеченные особенности и другие аспекты и принципы инноваций, описанных в настоящем документе, могут быть реализованы в различных средах. Такие среды и связанные приложения могут быть специально созданы для выполнения различных процессов и операций в соответствии с настоящим изобретением, или они могут включать в себя универсальный компьютер или вычислительную платформу, выборочно активируемую или реконфигурируемую кодом для обеспечения необходимой функциональности. Процессы, раскрытые в настоящем документе, по сути не связаны с каким-либо конкретным компьютером, сетью, архитектурой, средой или другим устройством, и могут быть реализованы с помощью подходящей комбинации аппаратных средств, программного обеспечения и/или встроенного микропрограммного обеспечения. Например, различные машины общего назначения могут использоваться с программами, написанными в соответствии с идеями настоящего изобретения, или может быть более удобно создать специализированное устройство или систему для выполнения требуемых способов и методов.

В настоящем описании термины компонент, модуль, устройство и т.д. могут относиться к любому типу логического или функционального устройства, процесса или блоков, которые могут быть реализованы различными способами. Например, функции различных блоков могут быть объединены друг с другом и/или распределены по любому

другому количеству модулей. Каждый модуль может быть реализован как программа, хранящаяся в материальной памяти (например, в памяти с произвольным доступом, на постоянном запоминающем устройстве, в памяти CD-ROM, на жестком диске), находящейся внутри или связанной с вычислительными элементами и т.д., раскрытыми выше, например, чтобы быть считанным обрабатывающим блоком для реализации функций инноваций, описанных в настоящем документе. Кроме того, модули могут быть реализованы в виде аппаратных логических схем, реализующих функции, охватываемые представленными в настоящем документе инновациями. Наконец, модули могут быть реализованы с использованием инструкций специального назначения (инструкции SIMD), программируемых логических массивов или любого их сочетания, которое обеспечивает желаемый уровень производительности и стоимости.

Аспекты описанных в настоящем документе систем и способов могут быть реализованы как функциональные возможности, запрограммированные в любой из множества схем, включая программируемые логические устройства (PLD), такие как программируемые вентильные матрицы (FPGA), устройства с программируемой логической схемой (PAL), электрически программируемые логические и запоминающие устройства и стандартные устройства на основе ячеек, а также специализированные интегральные схемы. Некоторые другие возможности для реализации аспектов включают в себя: запоминающие устройства, микроконтроллеры с памятью (такие как EEPROM), встроенные микропроцессоры, встроенное микропрограммное обеспечение, программное обеспечение и т.д. Кроме того, аспекты могут быть воплощены в микропроцессорах, имеющих программную эмуляцию схем, дискретную логику (последовательную и комбинаторную), заказных устройствах, нечеткой логике, нейронных сетях, других системах AI (искусственного интеллекта) или машинного обучения, квантовых устройствах и гибридах любых из вышеперечисленных типов устройств.

Следует также отметить, что различные логические схемы и/или функции, раскрытые в настоящем документе, могут быть задействованы с использованием любого количества комбинаций аппаратного обеспечения, встроенного микропрограммного обеспечения и/или данных и/или инструкций, воплощенных в различных машиночитаемых носителях, в терминах их поведения, передачи регистров, логической составляющей и/или других характеристик. Машиночитаемые носители, в которых могут быть воплощены такие отформатированные данные и/или инструкции, включают в себя, не ограничиваясь этим, носители энергонезависимой памяти в различных материальных формах (например, носители оптической, магнитной или полупроводниковой памяти), хотя не охватывают временные носители.

Если контекст явно не требует иного, повсюду в описании слова «содержит», «содержащий» и т.п. должны рассматриваться в инклюзивном смысле в противоположность исключительному или исчерпывающему смыслу; то есть в смысле «включая, но не ограничиваясь этим». Слова, использующие единственное или множественное число, также включают в себя множественное или единственное число,

соответственно. Кроме того, слова «в настоящем документе», «далее», «выше», «ниже» и т.п. относятся к настоящей заявке в целом, а не к каким-либо конкретным частям настоящей заявки. Когда слово «или» используется применительно к списку из двух или более предметов, оно покрывает все следующие интерпретации: любой из предметов в этом списке, все предметы в этом списке, и любая комбинация предметов в этом списке.

Другие варианты осуществления настоящего изобретения будут очевидными для специалиста в данной области техники при рассмотрении данного описания и реализации инноваций, раскрытых в настоящем документе. Подразумевается, что настоящее описание и примеры должны рассматриваться только как примерные, в то время как истинная область охвата и дух настоящего изобретения изложены в настоящем раскрытии и формуле изобретения, а в некоторых случаях - в различных связанных принципах соответствующей патентной доктрины.

ФОРМУЛА ИЗОБРЕТЕНИЯ

1. Система, содержащая:

квантовый регистр, который хранит квантовую информацию с использованием кубитов, содержащий компонент запутанности;

в которой кубиты выполнены с возможностью хранения квантовой информации с использованием частиц или объектов, организованных в решетку квантовых вентиляей; и

в которой кубиты выполнены с возможностью быть запутанными с одной или более различными системами и/или объектами, внешними по отношению к системе;

часы, которые обеспечивают тактовый цикл для квантового регистра; и

компонент вычисления связи кубитов, связанный с квантовым регистром и содержащий компонент суперпозиции:

в которой компонент вычисления связи кубитов выполнен с возможностью сдвига квантовой информации между кубитами; и

в которой кубиты выполнены с возможностью перехода в суперпозиционные состояния, определяемые характеристиками (например спином, направлением и т.д.) частиц или объектов;

в которой система хранит кубиты в различных состояниях с использованием физических качеств, которые определяют кубиты, выполненные с возможностью быть запутанными и суперпозиционированными в одно и то же время.

2. Система по п. 1 или изобретению по любому имеющемуся здесь пункту, в которой кубиты выполнены с возможностью хранения квантовой информации в течение одного и того же периода времени, определяемого одним или более тактовыми циклами часов.

3. Система по п. 1 или изобретению по любому имеющемуся здесь пункту, в которой кубиты выполнены с возможностью перехода в различные состояния в единицу времени, определяемую тактовым циклом часов.

4. Система по п. 1 или изобретению по любому имеющемуся здесь пункту, в которой компонент вычисления связи кубитов связан с квантовым регистром посредством компонента запутанности и компонента суперпозиции.

5. Система по п. 1 или изобретению по любому имеющемуся здесь пункту, дополнительно содержащая:

блок управления вентилями, который выполняет над кубитами манипуляции, которые конфигурируют кубиты так, что кубиты становятся невосприимчивыми к помехам.

6. Система по п. 5 или изобретению по любому имеющемуся здесь пункту, дополнительно содержащая компонент коррекции ошибок внутри блока управления вентилями, который исправляет ошибки на одном или более кубитах.

7. Система по п. 1 или изобретению по любому имеющемуся здесь пункту, в которой связь кубитов представляет собой дополнительную квантовую систему, расположенную между лентой чтения-записи и квантовым регистром.

8. Система по п. 1 или изобретению по любому имеющемуся здесь пункту, дополнительно содержащая один или более дополнительных компонентов, реализующих по меньшей мере одно из аспекта декогерирования, аспекта надежности и/или аспекта сложности/многообразия для содействия реализации квантового процессора (QPU).

9. Система по п. 1 или изобретению по любому имеющемуся здесь пункту, в которой кубиты реализуются как одна или более элементарных частиц.

10. Система по п. 9 или изобретению по любому имеющемуся здесь пункту, в которой элементарные частицы выполнены с возможностью хранения одного или более состояний и/или характеристик и ограничиваются предотвращением взаимодействия с внешними элементами, которые изменяют одно или более состояний и/или характеристик.

11. Система по п. 9 или изобретению по любому имеющемуся здесь пункту, в которой элементарные частицы представляют собой одну или более простых элементарных частиц, определяемых как сверхпроводящие электроны, изолированные протоны в вакууме, H , He^+ и/или другие легкие ионы и соответственно анионы.

12. Система по п. 9 или изобретению по любому имеющемуся здесь пункту, в которой частицы представляют собой одно или оба из: захваченных в искусственных силовых полях и/или экранированных от любой входящей частицы или квазичастицы.

13. Система по п. 12 или изобретению по любому имеющемуся здесь пункту, в которой искусственное силовое поле включает в себя одно или более микроскопических силовых полей;

причем опционально микроскопическое силовое поле включает в себя и/или использует тела атомов в кристалле с электронами в зоне проводимости внутри высокотемпературного сверхпроводника.

14. Гибридная квантовая компьютерная система, содержащая:

гибридный квантовый процессор, содержащий по меньшей мере один квантовый процессор и контроллер квантовой информации;

шину PCI(“взаимосвязь периферийных компонентов”)-express, связанную с гибридным квантовым процессором;

систему хранения в памяти, содержащую энергонезависимую память с произвольным доступом и связанную с шиной PCI-express; и

пре- и постпроцессинговые блоки, состоящие из различных типов обрабатывающих блоков и связанные с шиной PCI-express;

в которой система основана на ориентированной на обработку данных в памяти вычислительной архитектуре и выполнена с возможностью соединения различных типов обрабатывающих блоков вместе с по меньшей мере одним квантовым процессором посредством шины PCI-express, причем каждый из по меньшей мере одного квантового процессора является полностью адресуемым.

15. Система по п. 14 или изобретению по любому имеющемуся здесь пункту, выполненная с возможностью обеспечения когерентного потока данных кэша между разнородными обрабатывающими блоками (например, XPU, QPU и т.д.) посредством

ориентированной на обработку данных в памяти вычислительной архитектуры.

16. Система по п. 14 или изобретению по любому имеющемуся здесь пункту, которая дополнительно содержит встроенную когерентность кэша, которая подтверждает запись только тогда, когда данные были физически записаны и являются доступными для физических операций чтения другого устройства.

17. Гибридная квантовая процессорная система, содержащая:

арифметико-логическое устройство (ALU), содержащее множество квантовых вентиляей, которые хранят первую квантовую информацию; и

один или более блоков создания вентиля и/или блоков управления вентилями, связанных с ALU и выполненных с возможностью осуществления одного или обоих из запутанности и/или суперпозиции со второй квантовой информацией, хранящейся на частицах или объектах, внешних по отношению к ALU;

шину PCI-express, которая связывает один или более блоков создания вентиля и/или блоков управления вентилями с частицами или объектами, внешними по отношению к ALU, причем в зависимости от того, связана ли первая квантовая информация со второй квантовой информацией, ALU выполнено с возможностью обеспечения множества квантовых вентиляей в качестве единых типов вентиляей, и тем самым выдавать универсальные квантово-машинные коды.

18. Система по п. 17 или изобретению по любому имеющемуся здесь пункту, дополнительно содержащая один или более дополнительных компонентов, реализующих по меньшей мере одно из аспекта декогерирования, аспекта надежности и/или аспекта сложности/многообразия для содействия реализации квантового процессора (QPU).

19. Система по п. 17 или изобретению по любому имеющемуся здесь пункту, в которой кубиты выполнены с возможностью быть запутанными с одной или более различными системами и/или объектами, внешними по отношению к системе.

20. Система по п. 17 или изобретению по любому имеющемуся здесь пункту, в которой кубиты выполнены с возможностью перехода в суперпозиционные состояния, определяемые характеристиками (например спином, направлением и т.д.) частиц или объектов.

21. Система по п. 17 или изобретению по любому имеющемуся здесь пункту, которая хранит кубиты в различных состояниях с использованием физических качеств, которые определяют кубиты, выполненные с возможностью быть запутанными и суперпозиционированными в одно и то же время.

22. Система, содержащая:

квантовый регистр, который хранит квантовую информацию с использованием кубитов, причем кубиты выполнены с возможностью хранения квантовой информации с использованием частиц или объектов, организованных в решетку квантовых вентиляей;

часы, которые обеспечивают тактовый цикл для квантового регистра; и

компонент вычисления связи кубитов, связанный с квантовым регистром, причем компонент вычисления связи кубитов выполнен с возможностью сдвига квантовой

информации между кубитами;

причем эта система хранит кубиты в различных состояниях с использованием физических качеств.

23. Система по п. 22 или изобретению по любому имеющемуся здесь пункту, в которой квантовый регистр содержит компонент запутанности, и в которой кубиты выполнены с возможностью быть запутанными с одной или более различными системами и/или объектами, внешними по отношению к системе.

24. Система по п. 22 или изобретению по любому имеющемуся здесь пункту, в которой компонент вычисления связи кубитов содержит компонент суперпозиции, и в которой кубиты выполнены с возможностью перехода в суперпозиционные состояния, определяемые характеристиками (например спином, направлением и т.д.) частиц или объектов.

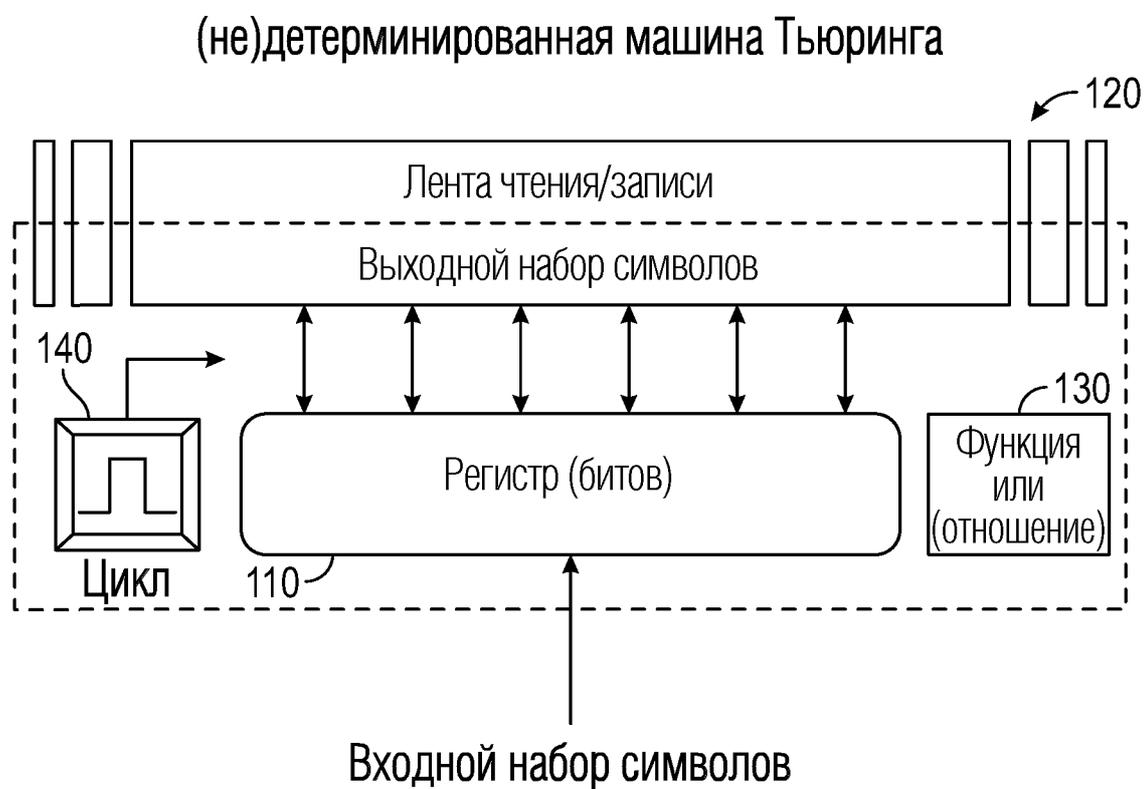
25. Система по п. 22 или изобретению по любому имеющемуся здесь пункту, в которой физические качества определяют кубиты, выполненные с возможностью быть запутанными и суперпозиционированными в одно и то же время.

26. Способ, включающий обработку квантовой информации, содержащий:

выполнение одного или более аспектов особенностей и/или функциональности, сформулированных в настоящем документе.

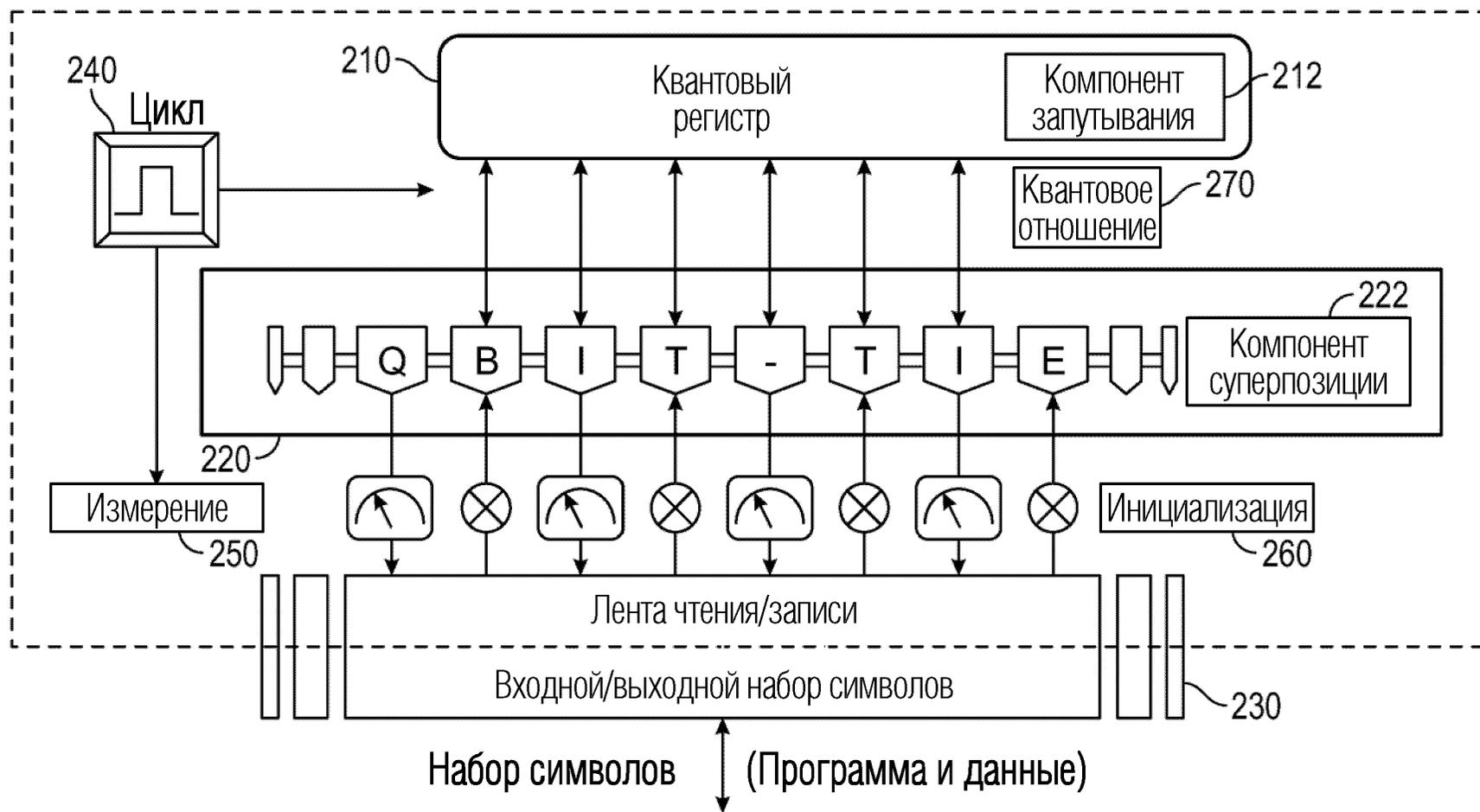
27. Один или более машиночитаемых носителей, содержащих исполняемые компьютером инструкции для выполнения любой из описанных в настоящем документе обработок, причем исполняемые компьютером инструкции исполняются посредством одного или более обрабатывающих компонентов для обработки инструкций и/или выполнения одного или более аспектов функций и/или функциональности, сформулированных в настоящем документе.

По доверенности



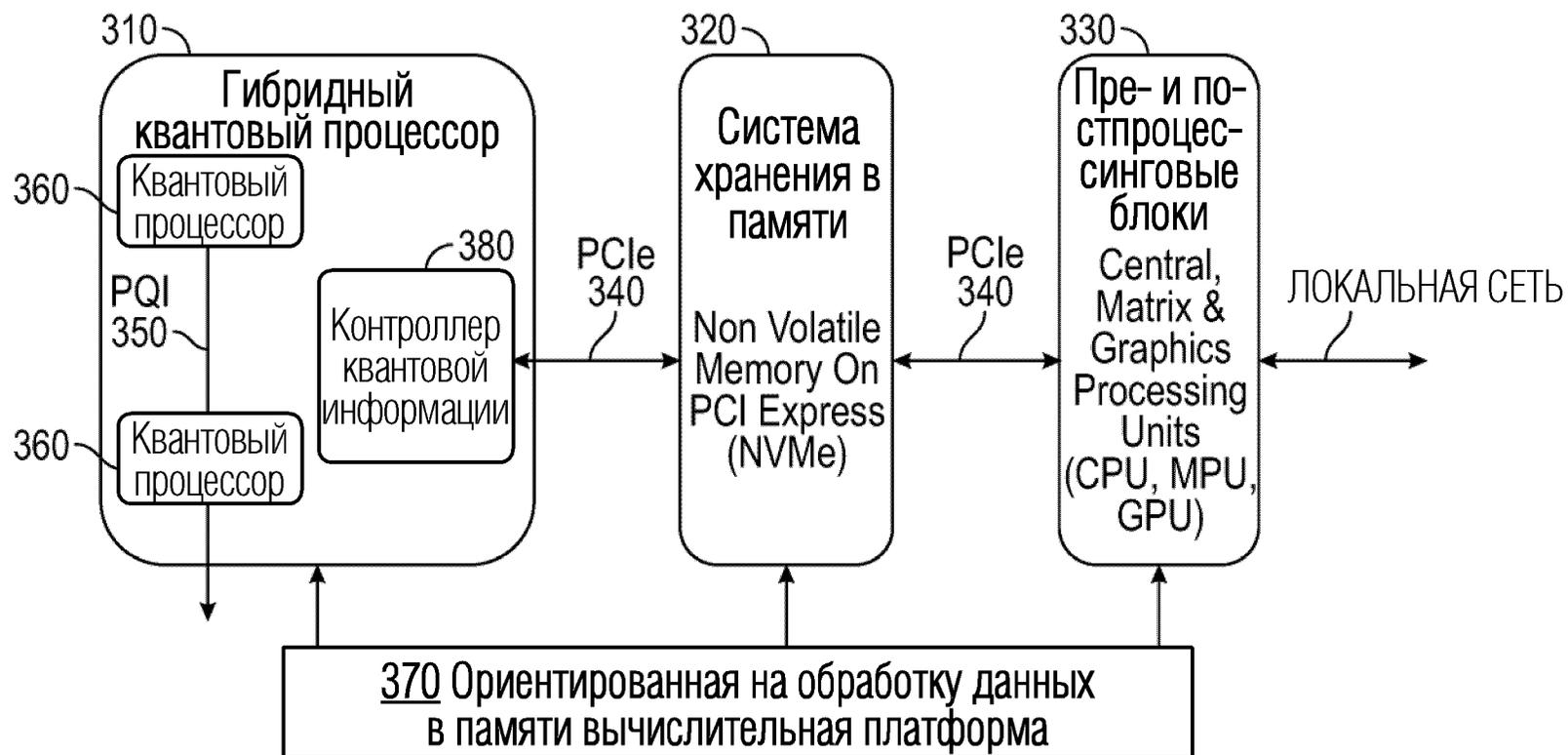
ФИГ. 1

Универсальная квантовая машина

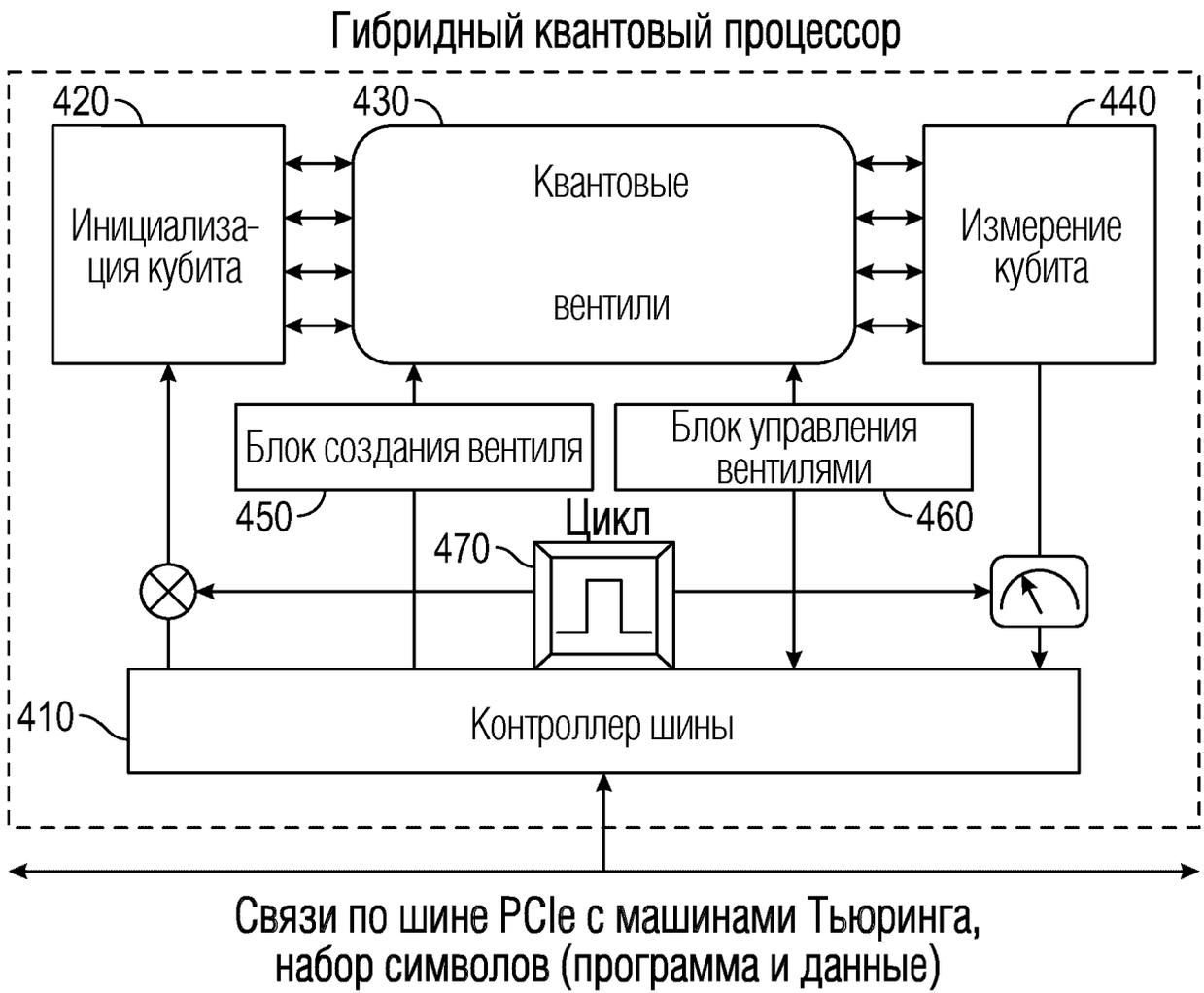


2/4

ФИГ. 2



ФИГ. 3



ФИГ. 4