

# Простые и сложные (составные) куниты в регистре квантового компьютера

П.А. Правильщиков,  
в.н.с, к.т.н, с.н.с, pavelp@ipu.ru  
ИПУ РАН, г. Москва

Вводится понятие простого и сложного (составного) кунита (англ. эквивалент *qudit*). Кратко изложены проблемы с временем когерентности (временем  $t_c$ ), возникающими у разработчиков квантовых компьютеров (КК) с регистром, содержащим 50 и более запутанных кубитов. Показано, что с ростом числа  $L$  запутанных кубитов время  $t_c$ , в течение которого и могут быть осуществлены квантовые вычисления, уменьшается, так как состояние запутанности кубитов является крайне хрупким. В качестве одного из возможных выходов из возникшего тупика в разработке КК предлагается использование в КК нового механизма квантового параллелизма, когда регистр КК построен не из кубитов, а из простых и сложных кунитов [1,2].

Introduces the concept of simple and composite *qudit*. Briefly outlined the problems with the coherence time (time  $t_c$ ) that arise in the development of quantum computers (QC) with a register containing 50 or more entangled qubits. It is shown that as the number  $L$  of entangled qubits increases, the time  $t_c$ , during which quantum computations can be performed, decreases, since the state of entanglement of qubits is extremely fragile. As one of the possible ways out of the impasse in the development of QC, the use of a new mechanism of quantum parallelism in the QC is proposed, when the QC register is built not of qubits, but of simple and composite *qudits*.

## Введение

Известно, что основой (можно сказать платформой), на которой функционируют системы CAD/CAM/PDM, является вычислительная техника (ВТ). В настоящее время уже появились первые коммерчески доступные КК, что ознаменовало начало квантовой революции в ВТ. Она открывает новые возможности для систем CAD/CAM/PDM. Однако неожиданно разработчики КК таких корпораций, как IBM, Google, Intel, а также других компаний и исследовательских групп университетов в США столкнулись с проблемой уменьшения времени  $t_c$ , т.е. времени когерентности, в течение которого могут быть произведены квантовые вычисления. Так, в конце 2017 на саммите IEEE Industry Summit on the Future of Computing исполнительный директор IBM Дарио Гил (*Dario Gil*) сообщил о завершении разработки 50-кубитного КК. Однако у 50-кубитного КК IBM время  $t_c$  равно всего лишь 90 мс ( $t_c = 90$  мс) [3].

Выяснилось, что с увеличением числа  $L$  запутанных кубитов в квантовом регистре время  $t_c$  уменьшается: чем больше число  $L$ , тем меньше время  $t_c$ . Корпорация Google также разработала квантовый процессор Бристлекон (*Bristlecone*) у которого регистр содержит уже 72 кубита [4]. Но, несмотря на успехи в разработке процессора с регистром, содержащим 72 кубита, сегодняшние кубиты Бристлекона нестабильны, что и приводит к большому числу ошибок в вычислениях. Для нормальной эксплуатации Бристлекон должен делать значительно меньше ошибок. В этих целях необходимо значительно повысить надёжность его квантового «железа», чтобы запустить этот процессор, хотя бы в мелкую серию. Как утверждают специалисты по надёжности, уменьшение времени  $t_c$  с ростом числа  $L$  запутанных кубитов в регистре КК приводит к существенному и растущему увеличению затрат на разработку аппаратуры, устойчивой к отказам (50% и более), и требует качественно новых кодов, исправляющих ошибки в вычислениях на КК. Это связано с тем, что запутанное состояние кубитов весьма хрупко. Его может разрушить небольшой скачок температуры или слабое электромагнитное воздействие (например, случайный фотон), либо вибрация, либо даже случайные звуки, что приводит к ошибкам в вычислениях. Есть и другие причины нестабильности, связанные с энергией корреляции запутанных кубитов. Отсюда можно предположить, что построить КК с регистром, содержащим большое число  $L$  запутанных кубитов (например,  $L \geq 100$ ), либо не удастся, либо потребует чрезмерно больших затрат на разработку схем, устойчивых к отказам, и принципиально новых кодов, исправляющих ошибки. Справедливости ради, заметим, что IBM в соответствии со своими планами собирается через 7 лет к 2025 создать КК, у которого регистр будет состоять из 100 запутанных кубитов. В наше время 7 лет в ВТ это большой срок, однако, ещё труднее будет построить КК с регистром из 1000 запутанных кубитов (т.е. когда  $L = 1000$ ), что явилось бы превращением в реальность давней мечты математика П. Шора, разработавшего квантовый алгоритм факторизации [5,6]. При наличии КК, у которого регистр содержит 1000 кубитов, алгоритм Шора может быстро «взломать» любой текст, зашифрованный с помощью алгоритма RSA (по некоторым оценкам – всего за 80 сек [7]).

Если в ближайшее время создать КК с регистром, у которого число запутанных кубитов  $L \geq 100$ , не удастся, то можно будет утверждать, что механизм квантового параллелизма, основанный на использовании запутанного состояния **всех** кубитов в регистре КК, исчерпал себя. В этом случае разработка новых мощных КК на базе данного механизма квантового параллелизма зайдёт в тупик. Здесь предполагается, что одним из возможных выходов из данного тупика является переход на новый механизм квантового параллелизма в КК. В его основе могут быть такие разряды квантового регистра как кутриты, куквадриты и в общем случае простые или сложные куниты.

## 1. Простые и сложные (составные) куниты

Под *простыми* кунитами здесь понимаются такие куниты, у которых в качестве физической основы предполагается квантовая характеристика (например, спин) одного квантового объекта или квантовой системы (например, атома или его ядра). Если в качестве физической основы простого кунита рассматривать спин атомного ядра, то в этом случае, как утверждает американский физик Д. Авшалом [8], кунит может одновременно содержать миллионы чисел. Другими словами, в настоящее время практически достижимым считается число  $\nu \approx 10^7$ , где  $\nu$  - количество чисел, которое может хранить один кунит. Напомним, что теоретически с точки зрения современной квантовой меха-

ники число  $\nu$  может быть больше любого наперёд заданного числа  $\tilde{N}$ . Однако конкретная величина  $\nu$  может меняться в зависимости от точности измерений спина, т.е. в зависимости от успехов *спинтроники* и *квантовой метрологии*. В настоящее время в Австралии уже реально создан КК, у которого регистр построен из *простых* кутритов ( $\nu = 3$ ) – см. [9, 10]. Некоторые исследовательские группы в Австрии пытаются создать КК с регистром, построенным из куквадритов ( $\nu = 4$ ), так как уже сегодня можно построить КК с регистром из кунитов, у которых  $\nu = 4$ . При этом такие куниты не будут находиться в запутанном состоянии.

*Сложным* кунитом в регистре КК будем называть кластер  $S_{\mu}$ , состоящий из множества  $\Lambda_q$  запутанных кубитов. Здесь  $|\Lambda_q| = \lambda$  и  $2 \leq \lambda \leq \Theta$ . Величина  $\Theta$  определяется эмпирически и обозначает некоторый предел надёжности функционирования КК с достаточным временем  $t_c$ . Сегодня, основываясь на результатах IBM можно утверждать, что  $\Theta \leq 50$ . Так как запутанные кубиты сильно связаны друг с другом, то такой кластер  $S_{\mu}$  можно рассматривать как один разряд квантового регистра  $QR$ . Ранее введены понятия *кунита* и *куэнка*, как эквивалентное обозначение квантового разряда, содержащего  $\nu$  чисел [11]. Теперь можно ввести различия между этими терминами, обозначающими простой и сложный кунит. В дальнейшем будем простой кунит по-прежнему именовать кунитом, а *сложный* кунит – куэнком. Таким образом, термин «*кунит*» обозначает *простой* квантовый разряд, содержащий  $\nu$  чисел, а термин «*куэнк*» обозначает кластер  $S_{\mu}$  из множества  $\Lambda_q$  запутанных кубитов, содержащий  $\nu$  чисел. Для куэнка число  $\nu = 2^{\lambda}$ . С точки зрения реализуемых функций куэнк в виде кластера  $S_{\mu}$  можно рассматривать как эквивалент простому куниту. Для демонстрации этого, выпишем суперпозицию вектора состояния куэнка, построенного из двух кубитов. В данном случае, это будет вектора  $|\psi\rangle_{\nu=4}$ :

$$|\psi\rangle_{\nu=4} = a_1|00\rangle + a_2|01\rangle + a_3|10\rangle + a_4|11\rangle \quad |a_1|^2 + |a_2|^2 + |a_3|^2 + |a_4|^2 = 1. \quad (1)$$

Коэффициенты  $a_1, a_2, a_3, a_4$  в (1) называются амплитудами. Справа в (1) для амплитуд выписано условие нормировки. В общем случае амплитуды в векторе состояния квантового разряда являются комплексными числами. Здесь же предполагается, что для решения многих задач с помощью нашего проблемно-ориентированного КК (например, для решения булевых уравнений [12]) амплитуды являются действительными числами. В этом случае конечное векторное пространство, которое используется для описания квантового разряда или всего квантового регистра, в линейной алгебре называют *евклидовым* [13, стр. 426]. Однако в теории квантовых вычислений в соответствии с традициями квантовой механики (КМ) для описания пространства квантового разряда или всего регистра КК используется термин «*гильбертово пространство*», которое обозначается символом  $H$ . Теперь в (1) переобозначим двоичные числа в дираковских скобках на десятичные числа:  $|00\rangle \rightarrow |0\rangle, |01\rangle \rightarrow |1\rangle, |10\rangle \rightarrow |2\rangle, |11\rangle \rightarrow |3\rangle$ . Тогда получим ту же суперпозицию вектора  $|\psi\rangle_{\nu=4}$  для куэнка в другой форме:

$$|\psi\rangle_{\nu=4} = a_1|0\rangle + a_2|1\rangle + a_3|2\rangle + a_4|3\rangle \quad |a_1|^2 + |a_2|^2 + |a_3|^2 + |a_4|^2 = 1. \quad (2)$$

Суперпозиция (2) полностью совпадает с суперпозицией куквадрита – см. [14-16], а куквадрит является частным случаем *простого* кунита. Примерами суперпозиций вектора  $|\psi\rangle_{\nu=4}$  для куквадрита служат следующие выражения:

$$|\psi\rangle_{\nu=4} = 1 \cdot |0\rangle + 0 \cdot |1\rangle + 0 \cdot |2\rangle + 0 \cdot |3\rangle; \quad |1|^2 + |0|^2 + |0|^2 + |0|^2 = 1. \quad (3)$$

$$|\psi\rangle_{\nu=4} = 0 \cdot |0\rangle + 1 \cdot |1\rangle + 0 \cdot |2\rangle + 0 \cdot |3\rangle; \quad |0|^2 + |1|^2 + |0|^2 + |0|^2 = 1. \quad (4)$$

$$|\psi\rangle_{\nu=4} = 0 \cdot |0\rangle + 0 \cdot |1\rangle + 1 \cdot |2\rangle + 0 \cdot |3\rangle; \quad |0|^2 + |0|^2 + |1|^2 + |0|^2 = 1. \quad (5)$$

$$|\psi\rangle_{\nu=4} = 0 \cdot |0\rangle + 0 \cdot |1\rangle + 0 \cdot |2\rangle + 1 \cdot |3\rangle; \quad |0|^2 + |0|^2 + |0|^2 + |1|^2 = 1. \quad (6)$$

Состояние куквадрита, который является частным случаем простого кунита или куэнка, также может быть описано транспонированными векторами амплитуд:  $V_1^T, V_2^T, V_3^T, V_4^T$  для суперпозиций (3)-(6) соответственно:

$$V_1^T = [1 \ 0 \ 0 \ 0]^T; \quad (7)$$

$$V_2^T = [0 \ 1 \ 0 \ 0]^T; \quad (8)$$

$$V_3^T = [0 \ 0 \ 1 \ 0]^T; \quad (9)$$

$$V_4^T = [0 \ 0 \ 0 \ 1]^T; \quad (10)$$

Для простого куквадрита, физической основой которых являются, например, спины атомных ядер, векторное пространство  $H$ , состоящее из четырёх векторов, наглядно можно показать с помощью рис 1.

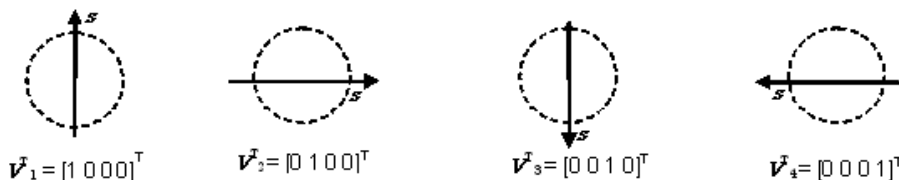


рис. 1. Спин  $s$  куквадрита и его вектор амплитуд

Запись суперпозиция (1) в форме (2) означает, что с математической точки зрения описания вектора состояния – вектора  $|\psi\rangle_{\nu=4}$  – для *простого* куквадрита и *сложного* куэнка, у которого  $\lambda = 2$  и  $\nu = 4$ , эквивалентны. Следовательно, математический аппарат, который предложен в [14], полностью применим для *сложного* куквадрита – частного случая куэнка, у которого  $\lambda = 2$  ( $\nu = 2^{\lambda} = 2^2 = 4$ ). Следовательно, полностью применимы для куэнка ( $\lambda = 2$ ) и квантовые логические элементы, которые разработаны для куквадритов [16]. По сути, в [16], приведён и метод построения

блочно-диагональных матриц новых квантовых логических элементов, что позволяет строить матрицы для всех  $16$  ( $2^2$ ) логических функций от двух переменных – см. [17, стр. 9].

## 2. Сравнение регистров двух КК, у которых регистр $QR_1$ построен из простых кунитов, а регистр $QR_2$ построен из куэнков

Рассмотрим два КК. У одного из них регистр  $QR_1$  построен из простых кунитов  $q_k$  и для них  $v = 16$ . У другого КК его регистр  $QR_2$  построен из куэнков. У каждого куэнка  $\xi_k$  число  $\lambda$  запутанных кубитов равно  $2$  ( $\lambda = 2; v = 4$ ). Каждый куэнк  $\xi_k$  рассматривается как один квантовый разряд, который может быть измерен отдельно, не затрагивая других куэнков в регистре  $QR_2$ . Это означает, что между собой куэнки в регистре  $QR_2$  **не** находятся в запутанном состоянии. Число разрядов в регистре у обоих КК одинаково и равно  $10$ . Сразу можно сказать, что у первого КК информационная ёмкость  $\varepsilon_1$  регистра  $QR_1$  равна  $16^{10}$  ( $\varepsilon_1 = 16^{10} = (2^4)^{10} = 2^{40} \approx 10^{12}$  чисел). У второго КК ёмкость  $\varepsilon_2$  регистра  $QR_2$  равна  $4^{10}$ , т.е.  $\varepsilon_2 = 4^{10} = (2^2)^{10} \approx 10^6$ . Следовательно,  $\varepsilon_1 \gg \varepsilon_2$ . Если обозначить символом  $H_1$  гильбертово пространство регистра  $QR_1$ , а символом  $H_2$  обозначить гильбертово пространство регистра  $QR_2$ , то можно говорить о том, что в гильбертовом пространстве  $H_1$  больше места, чем в пространстве  $H_2$ .

Пространство  $H_1$  квантового регистра  $QR_1$  можно разбить на подпространства  $H_{1,k} \triangleleft H_1$ , где  $H_{1,k}$  – гильбертово пространство кунита  $q_k$ , для которого  $v = 16$ . В свою очередь  $H_{1,k}$  можно разбить на  $4$  подпространства  $H_{1,k,i} \triangleleft H_{1,k}$  (где  $i = \overline{1, v} = \overline{1, 4}$ ). По сути, подпространство  $H_{1,k,i}$  – это пространство куквадрита, для которого  $v = 4$ . Схематично пространство  $H_{1,k,i}$  куквадрита  $q_k$  и эквивалентное ему пространство куэнка  $\xi_k$  ( $\lambda=2$ ), которое будет обозначаться символом  $H_{1,k}$ , показано выше на рис. 1. Таким образом, из сравнения двух регистров, можно сделать два вывода. Первый положительный вывод состоит в том, что ёмкость  $\varepsilon_1 \gg \varepsilon_2$ . Второй вывод говорит о том, что точность аппаратуры для измерения состояния кунитов  $QR_1$  должна быть выше, чем точность аппаратуры для измерения состояния куэнков в регистре  $QR_2$ . Точность изготовления квантовых логических элементов (вентилей) для реализации унитарных операторов в первом КК так же должна быть выше. Возможно поэтому, учитывая уменьшение времени  $t_c$  с ростом числа  $L$  запутанных кубитов в регистре КК, развитие КК сначала пойдёт по пути создания КК с регистром из куэнков, которые между собой не находятся в запутанном состоянии. При этом если куэнк будет содержать  $3$  запутанных кубита ( $\lambda=3$ ), то число  $v$  будет равно  $2^\lambda = 2^3 = 8$ . В этом случае можно будет говорить о *квантовом байте (кубите)* – квантовом аналоге классического байта. Тогда пространство  $H_{1,k}$  куэнка  $\xi_k$  ( $\lambda = 3$ ) будет содержать два подпространства куквадрита, что позволит, в частности, упростить коды, исправляющие ошибки в квантовых вычислениях. Возможно, по этому пути пойдут исследователи из Академии наук в Австрии в Вене и разработчики КК в Intel.

Однако и тех, и у других до сих пор не приведено математического описания куквадритов в виде унитарных операторов, и, следовательно, нет квантовых вентиляей, реализующих унитарные матрицы для куквадритов [16]. Далее приведены примеры унитарных матриц для куквадритов.

## 3. Блочно-диагональные матрицы и их подматрицы для куквадритов

Для выполнения квантовых D-алгоритмов, решающих, например, булевы уравнения [12], необходимы соответствующие схемы соединения унитарных операторов. Унитарные операторы для параллельной реализации многих бинарных логических операций с двумя массивами реализуются с помощью соответствующих квантовых вентиляей, описание функционирования которых осуществляется с помощью *однородных и неоднородных* блочно-диагональных матриц  $U_{B-D,\omega}$ . *Однородные* блочно-диагональные матрицы  $U_{B-D,\omega}$  — это такие блочно-диагональные матрицы, у которых все унитарные подматрицы одинаковы, т.е.  $A_1 = A_2 = \dots = A_\omega$ .

$$A_{B-D,\omega} = \begin{bmatrix} A_1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & A_2 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & A_\omega \end{bmatrix} \quad (11)$$

*Неоднородные* блочно-диагональные матрицы  $U_{B-D,\omega}$  — это такие блочно-диагональные матрицы, у которых **не** все унитарные подматрицы  $A_1, A_2, \dots, A_\omega$  одинаковы. Подчеркнём, что для того, чтобы блочно-диагональная матрица  $U_{B-D,\omega}$  была унитарной, все её подматрицы должны быть *симметрическими*. Для решения, например, булевых уравнений в качестве подматриц будут рассматриваться матрицы квантовых элементов, которые, по сути, представляют собой некоторые модификации известных квантовых элементов: элемент Паули X (квантовый логический элемент НЕ), элемент CNOT (управляемый инвертор или «сумма по модулю 2»), элемент И-НЕ, элемент «равнозначность», элемент обмена и другие. Иногда элемент CNOT называют элементом, реализующим функцию «неравнозначность» и обозначают символом « $\neq$ » [17, стр. 9]. Приведём два примера однородных блочно-диагональных матриц  $U_{B-D,v}$ . В первом примере приведена однородная блочно-диагональная матрица  $U_{B-D,\omega=v}$ , подматрицы которой реализуют операцию НЕ для куквадрита.

$$U_{B-D,\omega=v} = \begin{bmatrix} \tilde{M}_{4,1,1} & 0 & \dots & 0 \\ 0 & \tilde{M}_{4,1,2} & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & \tilde{M}_{4,1,v} \end{bmatrix} \quad (12)$$

В (12) на главной диагонали матрицы  $U_{B-D,\omega=v}$  в качестве подматриц расположены перестановочные матрицы  $\tilde{M}_{4,1}$ . Подчеркнём, что частным случаем перестановочной матрицы является матрица инвертора для кубита (матрица  $X_2$  элемента Паули):

$$X_2 = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix} \quad (13)$$

В общем случае матрица  $\tilde{M}_{4,1}$  имеет вид:

$$\tilde{M}_{4,1} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & \dots & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ 1 & 0 & \dots & 0 \end{bmatrix} \quad (14)$$

Более подробно описание инвертора для куквадритов и соответствующая матрица  $\tilde{M}_{4,1}$  приводится в [16].

Другим примером может служить однородная блочно-диагональная матрица  $U_{Б-Д,\neq}$  для элемента CNOT. В [17] для наименования булевой функции, которую реализует элемент CNOT, используют термин «*неравнозначность*» и обозначают её символом « $\neq$ ». В качестве подматрицы в матрице  $U_{Б-Д,\neq}$  выступает *симметрическая* матрица  $U_{\neq,j}$ :

$$U_{Б-Д,\neq} = \begin{bmatrix} U_{\neq,1} & 0 & \dots & 0 \\ 0 & U_{\neq,2} & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & U_{\neq,\bar{r}} \end{bmatrix} \quad (15)$$

*Симметрическая* подматрица  $U_{\neq,j}$  достаточно громоздка и имеет размерность  $28 \times 28$ . Компактная форма записи матрицы  $U_{\neq,j}$  имеет вид:

$$U_{\neq,j} = \begin{vmatrix} I_1 & O_1 & O_2 \\ O_3 & \tilde{M} & O_4 \\ O_5 & O_6 & I_2 \end{vmatrix} \quad (16)$$

В (16) подматрицы  $I_1$  и  $I_2$  являются *единичными* матрицами размерности  $2 \times 2$ . Перестановочная подматрица  $\tilde{M}$  является матрицей размерности  $24 \times 24$  – см. (14). Подматрицы  $O_1 - O_6$  являются нулевыми матрицами. Размерность  $O_1 - 24 \times 2$ ; размерность  $O_2 - 2 \times 2$ ; размерность  $O_3 - 2 \times 24$ ; размерность  $O_4 - 2 \times 24$ ; размерность  $O_5 - 2 \times 2$ ; размерность  $O_6 - 24 \times 2$ . Таким образом, удалось построить матрицу  $U_{\neq,j}$  (16), которая представляет математическое описание логической функции «*неравнозначность*» для двух куквадритов. Однако для реализации функции  $\neq$  пришлось использовать три куквадрита, из которых первый является управляющим. Квантовый вентиль, реализующий функцию  $\neq$  для двух куквадритов, является аналогом квантового вентиля CNOT для двух кубитов - см. также [16].

## Заключение

В годы заката кремниевых технологий для производства классических компьютеров и суперкомпьютеров нам повезло наблюдать начало квантовой революции в ВТ. «*Кремниевый закат*», прежде всего, ощутили такие компании, как GlobalFoundries, AMD, Intel, IBM и другие. Сегодня эти компании начали откладывать сроки введения новых кремниевых техпроцессов или вообще прекращать инвестиции в них. Отчасти это связано с удорожанием оборудования и высоким уровнем брака (низкий выход годных процессоров). К тому же производственные объемы и объемы продаж растут медленнее, чем планировалось. О массовом производстве и продаже некоторых новых чипов говорить не приходится. Реализация 7-, 5-, 3- и 2-*нм* техпроцессов, требующих больших инвестиций, может оказаться коммерчески невыгодной. Чтобы окупить инвестиции в производство, нужно выпустить по 150 млн чипов в год, а объемы продаж падают. Несмотря на неблагоприятные обстоятельства, корпорация IBM недавно представила первый в мире 5-нанометровый чип и сообщила о его многочисленных преимуществах. Однако сроков начала промышленного производства новых процессоров в IBM не назвали. Возможно, в связи с этим наблюдается определенная стагнация суперкомпьютерной отрасли и в рейтинге Top500 суперкомпьютеров мира. Уже сегодня инвестиции в разработку КК у некоторых компаний превосходят инвестиции в разработку экзафлопсных суперкомпьютеров.

Учитывая «*кремниевый закат*», в ИПУ РАН проводится теоретическое обоснование и моделирование проблемно-ориентированного КК (т.е. квантового ускорителя – КвУ) для решения логических уравнений, решения задач логического управления, решения задач построения тестов, решения задач функционально-воксельного моделирования в компьютерной графике. После этого предполагается разработать КвУ в «*железе*». Регистр КвУ и квантовые логические элементы предполагается построить с использованием кунитов или с помощью куэнков на основе технологии КРТ (*кадмий-ртуть-теллур*), либо на основе болометрических матриц. Известно, что в «*гильбертовом пространстве много места*», и наиболее эффективно использовать его позволяют простые куниты в регистре КвУ. Но на начальном этапе развития КК, возможно, будет использован гибридный подход: КК будут созданы на базе куэнков, т.е. на основе сложных кунитов, построенных как некоторый кластер из запутанных кубитов (здесь возможно использование и *простых* запутанных кутритов и куквадритов) - см. выше. Подобный подход требует достаточно надежного теоретического обоснования. Однако при этом квантовые D-алгоритмы и основные унитарные операции для куэнков на основе того математического аппарата, который предложен в [14], не изменятся.

Здесь уместно остановиться на причинах возникновения квантовой компьютерной гонки, о которой рассказано в [2, 15]. По нашему мнению, в условиях подготовки к кибервойнам основной причиной гонки является возможность решить с помощью КК проблемы криптографии в целях кибербезопасности того или иного государства. Важно также обеспечить кибербезопасность банковских онлайн-систем и мобильный банкинг. Другой причиной является экономика: первый, кто выйдет на рынок с новым качественным продуктом (т.е. с новым качественным КК), захватит 70% этого рынка. Так, канадская компания D-wave systems, продав 4 неполноценных и не универсальных КК, уже выручила  $\approx \$50$  млн. Остальным преследователям лидера в квантовом компьютеростроении может достаться не более 30%

рынка, либо придётся выходить на рынок с новым полноценным и универсальным КК. Аналитики исследовательской компании Communications Industry Researchers считают, что уже к 2023 прибыль рынка квантовых вычислений составит впечатляющие 8 миллиардов долларов. Сегодня в КК заинтересованы такие гиганты, как Samsung, Daimler, Honda, американский финансовый холдинг JP Morgan и другие.

Наконец, третьей причиной является переход к новой эпохе – эпохе квантовых вычислений, которые могут существенно ускорить научно-технический прогресс. Например, на основе квантовой химии с помощью КК могут быть разработаны новые лекарства для лечения ранее неизлечимых болезней, могут быть созданы новые сплавы и другие материалы для машиностроения при использовании *компьютерного дизайна материалов* на платформе КК. Иногда и сегодня создание новых материалов – это «*что-то среднее между искусством и кулинарией*», когда специалисты ведут поиск по старинке, вслепую осуществляя перебор тысячи вариантов. Ещё одним из возможных научно-технических приложений КК является возможность точного прогнозирования изменений климата Земли, а также возможность составлять оптимальные планы и прогнозы в целях управления большими системами. Особый интерес в рамках третьей причины возникновения квантовокомпьютерной гонки вызывают предложения учёных по моделированию с помощью КК столкновения элементарных частиц в рамках Стандартной модели (СМ). Моделирование на КК позволило бы отказаться (хотя бы временно) от строительства дорогостоящих коллайдеров и проведения на них натуральных экспериментов по столкновению частиц. Это связано с тем, что прогнозы некоторых физиков не оправдались. Прогнозы касались того, что на Большом адронном коллайдере будет зарегистрировано множество существенных отклонений от СМ. После 8 лет экспериментов по состоянию на конец 2017 такие отклонения не обнаружены. Поэтому пока, используя моделирование на КК, можно сэкономить на строительстве аналогичных коллайдеров для натуральных экспериментов, хотя, возможно, с несколько большей энергией столкновений.

### Литература

1. *Правильщиков П.А.* Новый механизм квантового параллелизма и его физические и математические основания. // Информационные технологии в проектировании и производстве. 2017. № 4. Стр. 7 – 28.
2. *Правильщиков П.А.* Необходимость и обоснование нового механизма квантового параллелизма. / Доклад в Трудях 17-й международной конференции «Системы проектирования, технологической подготовки производства и управления этапами жизненного цикла промышленного продукта» (CAD/CAM/PDM-2017). Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт проблем управления РАН им. Трапезников. 2017. Стр. 78-82.
3. *Трунин Д.* IBM построила 50-кубитный квантовый компьютер. / URL: <https://nplus1.ru/news/2017/11/13/IBM-50-qubit>
4. *Jones B.* Google Just Unveiled The World's Most Advanced Quantum Processor by Far. URL: <https://www.sciencelert.com/google-bristlecone-quantum-computing-72-qubits-chip>
5. *Shor P.W.* Algorithms for quantum computation: Discrete log and factoring. In *Proceedings of the 35th Annual Symposium on the Symposium on the Foundations of Computer Science*. S. Goldwasser, ed. (Los Alamitos, CA, 1994). IEEE Computer Society. P. 124–134.
6. *Shor P.W.* Algorithms for quantum computation: discrete logarithms and factoring. / Proceeding 35<sup>th</sup> Annual Symposium on Foundation *Shor, P.W.* Algorithms for quantum computation: Discrete log and factoring. In *Proceedings of the 35th Annual of Computer Science*. IEEE Press. Los Alamos. CA. 1996.
7. *Богданов Ю.И., Кокин А.А., Лукичёв В.Ф., Орликовский А.А., Семенихин И.А., Чернявский А.Ю.* Квантовая механика и развитие информационных технологий. / Труды МСКФ-2011.
8. *Антес Г.* Перспективы субатомных ИТ. Computerworld, 2006, № 37. P. 43-47. URL: <https://www.osp.ru/cw/2006/37/3188715> (Дата обращения: )
9. *Lanyon B.P., Barbieri M., Almeida M.P., Jennewein T. and all.* Quantum computing using shortcuts through higher dimensions. // *Phys. Rev. Lett.* 2008. Vol. 101. № 2 (April). P. 2-7.
10. *Lanyon B.P., Barbieri M., Almeida M.P., Jennewein T. and all.* Simplifying quantum logic using higher-dimensional Hilbert spaces. // *Nature Physics*, Vol. 5, No. 2. (2008), pp. 134-140.
11. *Правильщиков П.А.* Фундаментальные проблемы управления и гипервычисления. / Труды пятой международной конференции «Параллельные вычисления и проблемы управления». М.: Институт проблем управления. 26-28 октября 2010. — 1235 с. С. 709-757. ISBN 978-5-91450-064-8.
12. *Правильщиков П.А.* Квантовое решение булевых уравнений и проблема  $P=? NP$ . // «Информационные технологии в проектировании и производстве». 2018. № 1, Стр. 28-43.
13. *Бортаковский А.С., Пантелеев А.В.* Линейная алгебра в примерах и задачах. М.: Высш. Шк., 2010. — 591 с.
14. *Правильщиков П.А.* Новая квантовая математика: матричное исчисление кубических комплексов и квантовые D-алгоритмы. // Информационные технологии в проектировании и производстве. 2017. № 2, Стр. 21-32.
15. *Правильщиков П.А.* Квантовое превосходство и решение алгебраических уравнений. // Информационные технологии в проектировании и производстве. 2018. № 3. Стр. 49-60.
16. *Правильщиков П.А.* Новая квантовая логика: новые однородные и неоднородные квантовые логические элементы. // Информационные технологии в проектировании и производстве. 2018. № 4. Стр. 14-25.
17. *Гиршберг В.В., Доманицкий С.М., Кутлер Н.П., Петрухин В.П., Пранцишвили И.В. и Ходнев В.В.* Типовые узлы на полупроводниковых логических и функциональных элементах серии ЭТ. М.–Л.: из-во «Энергия», 1966, 144 с. (Библиотека по автоматике, вып. 212).