Практическое применение векторно-матричной модели вычислений

В.Ю. Ходченков

***Аннотация*— В статье представлена векторно-матричная модель вычислений, основанная на архитектуре SIMD (Single Instruction, Multiple Data), которая обеспечивает высокую эффективность при выполнении параллельных операций над большими массивами данных. Основной акцент сделан на интеграцию принципов параллельных векторных вычислений в классические вычислительные архитектуры, что позволяет значительно повысить быстродействие при решении специализированных задач, таких как криптография, обработка больших данных и оптимизационные задачи, в частности, множественный рюкзак. Векторно-матричная модель позволяет эмулировать квантовые вычисления на традиционных процессорах, что расширяет возможности применения квантовых алгоритмов в классических системах. В статье подробно рассмотрены методы, используемые для реализации алгоритмов умножения матриц, криптографических операций и задач планирования, с акцентом на повышение производительности и снижение энергозатрат. Также обсуждаются преимущества предложенного подхода при решении задач реального времени и улучшение устойчивости к атакам на основе анализа времени выполнения.**

***Ключевые слова*— векторно-матричная модель, SIMD, параллельные вычисления, криптография, множественный рюкзак.**

I. Введение

Современные вызовы в области вычислительных технологий требуют поиска новых подходов для повышения эффективности и скорости обработки данных. В данной статье представлена разработанная автором векторно-матричная модель вычислений, которая реализует параллельные операции на SIMD (Single Instruction, Multiple Data) регистрах. Эта модель предназначена для ускорения специализированных вычислений за счёт использования принципов параллелизма и многомерных матриц, но на традиционных процессорах [1, 2, 3].

Основная цель данной векторно-матричной модели заключается в том, чтобы интегрировать принципы параллельных векторных вычислений в классические вычислительные архитектуры, обеспечивая значительное повышение быстродействия при работе с большими объёмами данных. В отличие от традиционных методов, новая модель позволяет одновременно выполнять одну и ту же операцию на множестве данных, что особенно важно в контексте обработки данных и криптографии [4, 5, 6].

II. Теоретические основы векторно-матричной модели

A. Принципы работы SIMD регистров

SIMD (Single Instruction, Multiple Data) — это архитектурная модель, при которой одна инструкция может быть применена к нескольким данным одновременно. Этот подход особенно эффективен в задачах, связанных с обработкой массивов данных, где одна и та же операция должна быть выполнена над множеством элементов.

B. Основы SIMD архитектуры

SIMD регистры предназначены для выполнения параллельных операций над несколькими данными за один такт процессора. Они объединяют несколько значений в одном регистре, и операции, такие как сложение, умножение или логические преобразования, могут выполняться одновременно над всеми значениями. Это приводит к значительному увеличению производительности, особенно в задачах, связанных с графикой, мультимедиа и числовыми вычислениями.

Современные процессоры оснащены специализированными SIMD регистрами, такими как MMX, SSE, AVX в процессорах Intel и AMD, и NEON в ARM. Эти регистры имеют различные размеры (от 64 до 512 бит и более) и позволяют обрабатывать несколько целых чисел или чисел с плавающей запятой одновременно. Например, 256-битный регистр может содержать восемь 32-битных чисел с плавающей запятой, и одна инструкция может применяться ко всем восьми числам одновременно.

C. Роль SIMD регистров в векторно-матричной модели

Векторно-матричная модель вычислений, основанная на SIMD регистрах, позволяет выполнять сложные операции над большими массивами данных с высокой степенью параллелизма. Каждая операция в модели осуществляется над векторами данных, которые представлены в виде многомерных матриц. В рамках SIMD архитектуры такие операции могут быть выполнены значительно быстрее, чем при традиционных подходах.

Например, умножение матриц, которое является одной из ключевых операций в квантовых вычислениях, может быть эффективно реализовано с использованием SIMD

Статья получена 7 июня 2025.

В.Ю. Ходченков – Смоленский государственный университет (email: tansdf@mail.ru)

регистров. Это позволяет выполнять параллельные вычисления над строками и столбцами матриц, сокращая общее время выполнения операции.

III. Практическое применение векторно-матричной модели

A. Обзор задач, подходящих для применения модели

Векторно-матричная модель вычислений, основанная на параллелизме с использованием SIMD регистров, открывает новые возможности для решения ряда сложных вычислительных задач. Эта модель особенно эффективна в задачах, где требуется одновременная обработка большого количества данных, а также в тех, где традиционные методы сталкиваются с ограничениями по производительности. В данном разделе мы рассмотрим основные классы задач, которые могут быть решены с использованием предложенной модели [7].

B. Криптографические задачи

Криптография — одна из ключевых областей, где векторно-матричная модель может проявить свои сильные стороны.

Векторно-матричная модель позволяет эффективно реализовать алгоритмы шифрования и дешифрования, основываясь на описанных выше принципах. Например, такие алгоритмы, как RSA и алгоритмы на основе эллиптических кривых, могут быть ускорены за счёт параллельной обработки данных и оптимизации ключевых операций, таких как умножение и возведение в степень. Это достигается за счёт одновременного применения операций к большим массивам данных, что существенно сокращает время выполнения криптографических операций [8, 9].

Кроме того, использование векторно-матричной модели в криптографии может обеспечить более высокую устойчивость к атакам, основанным на анализе времени выполнения или потребляемой энергии, за счёт параллельной обработки данных и минимизации числа последовательных операций.

C. Электроника

Векторно-матричная модель вычислений может быть применена для решения проблем: минимизации времени завершения всех задач, минимизации суммарного взвешенного раннего выполнения и минимизации суммарного взвешенного опоздания, что согласуется с многоцелевым подходом, представленным в двухэтапном генетическом алгоритме для задач планирования [10].

Предложенная модель может упростить применение гибридных генетических алгоритмов для оптимизации последовательности размещения компонентов на плате, улучшить скорость расчёта оптимального расписания пробуждения мобильных систем для оптимизации расхода энергии [11].

D. Обработка больших данных

Современные задачи обработки данных требуют всё более мощных вычислительных ресурсов, особенно в условиях работы с большими объёмами информации. Векторно-матричная модель идеально подходит для таких задач, предоставляя возможность параллельной обработки данных с использованием SIMD регистров. Это особенно важно в приложениях, связанных с анализом больших данных (Big Data), машинным обучением и искусственным интеллектом.

Например, в задачах, связанных с обработкой изображений или видео, модель может ускорить выполнение операций, таких как фильтрация, преобразования Фурье или свёрточные операции, за счёт параллельной обработки пикселей или других элементов данных. Это позволяет значительно улучшить производительность и сократить время обработки, что особенно важно для задач реального времени.

Аналогично, в задачах машинного обучения, связанных с обучением нейронных сетей, векторно-матричная модель может ускорить процессы вычисления градиентов, матричных умножений и других операций, что приведёт к более быстрому обучению моделей и повышению их точности.

E. Формализация задачи множественного рюкзака

Задача множественного рюкзака (Multiple Knapsack Problem, MKP) является важной оптимизационной задачей, которая встречается в различных приложениях, таких как логистика, распределение ресурсов, планирование и управление запасами. Она заключается в том, чтобы разместить набор предметов в нескольких рюкзаках таким образом, чтобы максимизировать общую ценность предметов, не превышая заданные ограничения по весу или объёму рюкзаков.

Формально, задача множественного рюкзака может быть сформулирована следующим образом:

Пусть дано:

n предметов, каждый из которых характеризуется весом w_i и ценностью v_i $(i = 1, 2, \dots, n)$.

m рюкзаков, каждый из которых имеет ограничение по весу W_j $(j = 1, 2, \dots, m)$.

Требуется определить, какие предметы следует положить в каждый из рюкзаков, чтобы максимизировать суммарную ценность предметов в рюкзаках, при этом суммарный вес предметов в каждом рюкзаке не должен превышать его ограничения по весу.

Задача может быть математически записана в виде следующей оптимизационной модели:

Целевая функция (максимизация ценности):

Максимизировать $\Sigma_{j=1}^{m} \Sigma_{i=1}^{n} v_i * x_{ij}$

Ограничения по весу для каждого рюкзака:

$$\Sigma_{i=1}^{n} w_i * x_{ij} \leq W_j, \qquad \forall\, j = 1, 2, \dots, m$$

Дополнительные ограничения:

$$x_{ij} \in \{0, 1\}, \ \forall\, i = 1, 2, \dots, n \text{ и } j = 1, 2, \dots, m$$

Для решения задачи множественного рюкзака с использованием векторно-матричной модели, задача может быть преобразована в форму, удобную для параллельной обработки. Векторно-матричная модель позволяет одновременно рассматривать различные комбинации предметов и рюкзаков, что значительно ускоряет процесс поиска оптимального решения.

F. Векторное представление данных:

- Веса предметов и их ценности можно представить в виде векторов $w = (w_1, w_2, \dots, w_n)$ и $v =$

$(v_1, v_2, \dots, v_n)$.
- Состояние рюкзаков можно описать матрицей решений X размерности n × m, где элемент X_{ij} соответствует значению x_{ij}.

Процесс решения задачи заключается в поиске такой матрицы X, которая максимизирует целевую функцию при выполнении всех ограничений.

Формализация задачи множественного рюкзака с использованием векторно-матричной модели демонстрирует, как сложные оптимизационные задачи могут быть решены эффективно за счёт параллельной обработки данных. Модель позволяет одновременно рассматривать множество решений и быстро находить оптимальные комбинации, что делает её мощным инструментом для решения задач, требующих высокопроизводительных вычислений.

IV. Решение задачи множественного рюкзака с использованием модели

В этом разделе мы рассмотрим, как векторно-матричная модель вычислений может быть использована для решения задачи множественного рюкзака. Мы продемонстрируем, как предложенная модель позволяет эффективно и параллельно обрабатывать данные для нахождения оптимального решения задачи.

A. Этап 1: Инициализация данных

Для начала необходимо инициализировать все входные данные задачи:
- Каждый предмет i представлен вектором $x_i = [v_i, w_i]$, где v_i - ценность, а w_i - вес.
- Мы определяем 2D-матрицу D размером $m \times (C_{max} + 1)$, где m - количество рюкзаков, а C_{max} - максимальная вместимость среди всех рюкзаков. Каждый элемент $D_{j,c}$ представляет максимальную ценность, достижимую для рюкзака j с вместимостью c.

B. Этап 2: Подготовка вычисления

Инициализируем нулевую матрицу $D_{j,c}$ - эта инициализация означает, что с нулем предметов максимальная достижимая ценность равна нулю для любого рюкзака и вместимости.

Определим смещённую матрицу S как:

$$S_{j,c} = D_{j,c-w_i} + v_i,$$

для всех $c \geq w_i$.

C. Этап 3: Вычисление

Для каждого предмета x_i заполняем смещённую матрицу S, значения матриц $D_{j,c}$ и $S_{j,c}$ определяем в соответствующие пары SIMD регистров.

Выполняем суммирование значений оригинальной $D_{j,c}$ и каждой из смещённых матриц $S_{j,c}$ используя алгоритм сложения векторов, описанный выше.

D. Этап 4: Получение финального решения

Максимальное значение матрицы $D_{j,c}$ – является искомым ответом к задаче максимизации ценности.

V. Приложения

Одним из наиболее перспективных направлений является использование квантовых алгоритмов в классических вычислительных системах. Предложенная векторно-матричная модель вычислений способна к эффективной реализации квантовых принципов, таких как суперпозиция и параллельное вычисление, но на традиционных процессорах [12, 13, 14].

Интеграция принципов квантовых вычислений в классические вычислительные архитектуры становится возможным благодаря данной векторно-матричной модели, обеспечивая значительное повышение быстродействия при работе с большими объёмами данных [15, 16].

Преимущества SIMD в контексте квантовых вычислений

SIMD архитектура идеально подходит для реализации квантовых операций на классических процессорах благодаря своей способности выполнять параллельные вычисления. В квантовой механике суперпозиция позволяет кубитам находиться в нескольких состояниях одновременно, и эта концепция может быть эмулирована на классических системах с использованием SIMD регистров.

Использование SIMD регистров для реализации векторно-матричной модели вычислений позволяет получить следующие преимущества:

1. Повышение производительности: Одновременная обработка нескольких данных значительно ускоряет вычислительный процесс.
2. Снижение энергозатрат: За счёт выполнения большего числа операций за один такт процессора уменьшается общая потребляемая энергия.
3. Эффективное использование ресурсов: SIMD регистры позволяют минимизировать количество инструкций, необходимых для выполнения вычислительных задач.

Таким образом система позволяет эмулировать квантовые вычисления [17, 18, 19].

VI. Алгоритм сложения векторов с использованием предложенной модели вычислений

Предложенный подход основан на использовании пары «связанных» SIMD регистров в качестве представления одного «кубита». Такой подход позволяет приближённо, с достаточно высокой точностью реализовать координаты оного кубита. Следует лишь наложить ограничение на числа, записанные в регистр так, чтобы сумма их квадратов равнялась единице. Это позволит перейти к воспроизведению квантового алгоритма на не-квантовом компьютере [20, 21].

Для этого возьмём два вектора a и b, такие что: $a \in Q^2$, $b \in Q^2$

Нормы этих векторов будем считать равными r: $\|a\| = \|b\| = r$

Пусть: $a' = a/r$, $b' = b/r$

Получим нормализованные вектора.

В случае квантового сумматора, первая координата первого вектора записывается в первую координату первого кубита как $\sqrt{a1'}$. В нашем случае, занесём обе координаты первого вектора в связанную пару SIMD регистров, олицетворяющих кубит. Аналогично поступим и со вторым вектором.

Далее в схемах будем использовать обозначение:

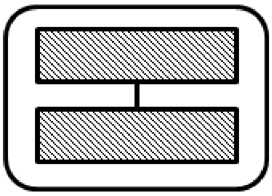

Рис. 1: Эмулированный кубит

Где заштрихованные прямоугольники, это SIMD регистры, связанные между собой вертикальной линией. Будем считать верхний SIMD регистр первым, а нижний вторым. Прямоугольник со скруглёнными краями обозначает, что данную связанную пару SIMD регистров, рассматриваем как единый объект – эмулированный кубит [6].

«Согласно квантовой реализации алгоритма сложения векторов, дублируем имеющиеся пары SIMD регистров, ради увеличения точности вычисления и соответствия квантовым операциям. Далее, увеличим значение, записанное в первый SIMD регистр каждого эмулированного $2n + 1$ -го и $2n$ -ого эмулированного кубита в k^n раз. Теперь проведем единовременное измерение всех полученных эмулированных кубит. В результате мы получим последовательную цепочку нулей и единиц – так называемы базисных состояний кубит. Затем, начиная с номера m, каждые две позиции не будут содержать пары нулей, что позволит полагать, что эмулированный кубит перемещается во второе базисное состояние» [22, 23]. Следовательно, мы можем определить произведение первых SIMD регистров пары эмулированных кубитов как:

$$\frac{1}{a1' \times b1'} = k^{2m} \times \left(1 + \frac{1}{k^2}\right)$$

Знак неравенства квадратов координат изменился начиная с выбранного нами числа m, учитывая количество дублирующих пар SIMD регистров и шаг умножения значений k, мы получим пределы определения a1' * b1', затем выберем значение как среднее значение между пределами.

Обозначим правую часть равенства как X.

Аналогично, зная число p, начиная с которого в каждой позиции будет содержаться единица, произведение вторых координат определим, как:

$$\frac{1}{1 - (a1' + b1') + a1' \times b1'} = k^{2p} \times (1 + k^2)$$

Правую часть равенства обозначим как Y.

Получаем:

$$a1' + b1' = \frac{1}{X} - \frac{1}{Y} + 1$$

Аналогично для вторых координат векторов.

Используя полученную формулу, определяем сумму векторов как:

$$a + b = (a' + b') \times r$$

Таким образом, реализация квантового алгоритма на SIMD регистрах прошла успешно [24, 25].

VII. Заключение

Предложенная векторно-матричная модель вычислений, основанная на использовании SIMD регистров, открывает новые перспективы в области вычислительных технологий. Модель демонстрирует возможность эмуляции квантовых операций на традиционных процессорах, что позволяет значительно ускорить выполнение вычислений и улучшить производительность в задачах, требующих параллельной обработки данных. Применение данной модели особенно актуально в таких областях, как криптография и обработка больших данных, где важна высокая скорость и точность вычислений. Несмотря на то, что использование квантовых принципов на классических архитектурах имеет свои ограничения, предложенный подход предоставляет важные инструменты для развития высокопроизводительных вычислительных систем, которые могут эффективно решать сложные задачи современного мира.

Автор выражает благодарность своему научному руководителю В.И. Мунерману за поддержку и помощь в процессе исследования.

Библиография

[1] Feynman, R.P. Simulating physics with computers // International Journal of Theoretical Physics. — 1982. — V. 21. — Number 6. — P. 467—488. doi:10.1007/BF02650179.

[2] Valiev, K.A., 2005. Quantum computers and quantum computing. Advances in physical sciences, 175 (1), pp.3-39.

[3] Мунерман В. И. Параллельная обработка данных. Методы и средства //Математическая морфология: электронный математический и медико-биологический журнал. – 1997. – Т. 2. – №. 2. – С. 213-227.

[4] Мунерман В. И., Самойлова Т. А. Алгебраический подход к алгоритмизации задач маршрутизации //Системы высокой доступности. – 2018. – Т. 14. – №. 5. – С. 50-56.

[5] В.И., Ходченков В.Ю. Алгоритм сложения векторов на квантовом компьютере // Системы компьютерной математики и их приложения: материалы XX Международной научной конференции. – Смоленск: Издательство СмолГУ, 2019. – Вып.20. Ч.1 – С.124–128.

[6] Hanneke D. et al. Realization of a programmable two-qubit quantum processor //Nature Physics. – 2010. – Т. 6. – №. 1. – С. 13-16.

[7] Pashkin Y. A. et al. Coherent manipulation of coupled Josephson charge qubits //Physica C: Superconductivity and its applications. – 2005. – Т. 426. – С. 1552-1560.

[8] Соколов Н.П. Введение в теорию многомерных матриц. - Киев: Наукова думка, 1972.

[9] Мунерман В. И., Использование матричной модели для обоснования выбора структур вычислительных систем и оптимизации процессов обработки файлов, Москва, 1985

[10] Kachitvichyanukul, V., Sitthitham, S. A two-stage genetic algorithm for multi-objective job shop scheduling problems. J Intell Manuf 22, 355–365 (2011). https://doi.org/10.1007/s10845-009-0294-6

[11] S. Rostami, H. D. Trinh, S. Lagen, M. Costa, M. Valkama and P. Dini, "Wake-Up Scheduling for Energy-Efficient Mobile Devices," in IEEE Transactions on Wireless Communications, vol. 19, no. 9, pp. 6020-6036, Sept. 2020, doi: 10.1109/TWC.2020.2999339. keywords: {Mobile handsets;Delays;Modems;Power demand;5G mobile communication;Energy consumption;Scheduling;5G;machine learning;wake-up scheme;energy efficiency;scheduling;LSTM},

[12] Van der Sar T. et al. Decoherence-protected quantum gates for a hybrid solid-state spin register //Nature. – 2012. – Т. 484. – №. 7392. – С. 82-86.

[13] Bernien H. et al. Probing many-body dynamics on a 51-atom quantum simulator //Nature. – 2017. – Т. 551. – №. 7682. – С. 579-584.

[14] Bennett C. H., Brassard G., Crépeau C. et al. Teleporting an unknown quantum state via dual classical and Einstein-Podolsky-Rosen channels // Phys. Rev. Lett. — American Physical Society, 1993. — Vol. 70, Iss. 13. — P. 1895–1899. — ISSN 0031-9007; 1079-7114; 1092-0145 — doi:10.1103/PHYSREVLETT.70.1895 — PMID:10053414

[15] Kelly J. A preview of Bristlecone, Google's new quantum processor (2018) //Google AI Blog (Retrieved 5 January 2019): https://ai. googleblog. com/2018/03/a-preview-of-bristlecone-googles-new. html.

[16] Valiev, K.A., 2005. Quantum computers and quantum computing. Advances in physical sciences, 175 (1), pp.3-39.

[17] Захаров В. Н., Мунерман В. И., Самойлова Т. А. Параллельные методы вывода ассоциативных правил в технологиях in-database и in-memory //II Международная научная конференция «Конвергентные когнитивно-информационные технологии»: сб. тр. науч. конф. – 2017. – С. 219-225.
[18] Гендель Е.Г., Мунерман В.И. Применение алгебраических моделей для синтеза процессов обработки файлов – Управляющие системы и машины, Киев: Наукова думка, 1984, 4. – с.69-72.
[19] Гендель Е.Г., Мунерман В.И., Шкляр Б. Ш. Оптимизация процессов обработки данных на базе алгебраических моделей – Управляющие системы и машины, Киев: Наукова думка, 1985, 6. – с.91-95.
[20] Мунерман В.И. Объектно-ориентированная модель массовой обработки данных. – М.: Системы высокой доступности, № 4, т. 7, 2011, с. 72-74.
[21] Draper T. G. Addition on a quantum computer //arXiv preprint quant-ph/0008033. – 2000.
[22] Квантовые вычисления против классических: зачем нам столько цифр, блог компании Сбербанк, математика: https://habr.com/ru/company/sberbank/blog/343308/
[23] E.F. Codd. Providing OLAP for end-user analysis: An IT mandate. ComputerWorld, 1993.
[24] Мунерман В. И. Алгебраический подход к подготовке данных для вывода ассоциативных правил //Highly available systems Журнал включен в перечень ВАК. – 2017. – С. 34.
[25] Григорьева Г.М., Миронов А.И., Мунерман В.И., Ходченков В.Ю. Алгоритм сложения векторов на квантовом компьютере // Системы компьютерной математики и их приложения: материалы XX Международной научной конференции. – Смоленск: Издательство СмолГУ, 2019. – Вып.20. Ч.1 – С.124–128.

Practical Application of the Vector-Matrix Model of Computations

Valerii Khodchenkov

Abstract - **The paper presents a vector-matrix computational model based on the SIMD (Single Instruction, Multiple Data) architecture, which ensures high efficiency in performing parallel operations on large data arrays. The main focus is on integrating the principles of parallel vector computations into classical computing architectures, significantly increasing performance when solving specialized tasks such as cryptography, big data processing, and optimization problems, particularly the multiple knapsack problem. The vector-matrix model enables the emulation of quantum computing on traditional processors, expanding the applicability of quantum algorithms in classical systems. The paper provides a detailed discussion of methods used to implement matrix multiplication algorithms, cryptographic operations, and scheduling problems, with an emphasis on improving performance and reducing energy consumption. The advantages of the proposed approach in solving real-time tasks and enhancing resilience to side-channel attacks, such as timing analysis, are also discussed.**

Keywords - **vector-matrix model, SIMD, parallel computing, cryptography, multiple knapsack.**

REFERENCES

[1] Feynman, R.P. Simulating physics with computers // International Journal of Theoretical Physics. — 1982. — V. 21. — Number 6. — P. 467—488. doi:10.1007/BF02650179.

[2] Valiev, K.A., 2005. Quantum computers and quantum computing. Advances in physical sciences, 175 (1), pp.3-39.

[3] Munerman V. I. Parallel'naja obrabotka dannyh. Metody i sredstva //Matematicheskaja morfologija: jelektronnyj matematicheskij i mediko-biologicheskij zhurnal. – 1997. – T. 2. – №. 2. – S. 213-227.

[4] Munerman V. I., Samojlova T. A. Algebraicheskij podhod k algoritmizacii zadach marshrutizacii //Sistemy vysokoj dostupnosti. – 2018. – T. 14. – №. 5. – S. 50-56.

[5] V.I., Hodchenkov V.Ju. Algoritm slozhenija vektorov na kvantovom komp'jutere // Sistemy komp'juternoj matematiki i ih prilozhenija: materialy XX Mezhdunarodnoj nauchnoj konferencii. – Smolensk: Izdatel'stvo SmolGU, 2019. – Vyp.20. Ch.1 – S.124–128.

[6] Hanneke D. et al. Realization of a programmable two-qubit quantum processor //Nature Physics. – 2010. – T. 6. – №. 1. – S. 13-16.

[7] Pashkin Y. A. et al. Coherent manipulation of coupled Josephson charge qubits //Physica C: Superconductivity and its applications. – 2005. – T. 426. – S. 1552-1560.

[8] Sokolov N.P. Vvedenie v teoriju mnogomernyh matric. - Kiev: Naukova dumka, 1972.

[9] Munerman V. I., Ispol'zovanie matrichnoj modeli dlja obosnovanija vybora struktur vychislitel'nyh sistem i optimizacii processov obrabotki fajlov, Moskva, 1985

[10] Kachitvichyanukul, V., Sitthitham, S. A two-stage genetic algorithm for multi-objective job shop scheduling problems. J Intell Manuf 22, 355–365 (2011). https://doi.org/10.1007/s10845-009-0294-6

[11] S. Rostami, H. D. Trinh, S. Lagen, M. Costa, M. Valkama and P. Dini, "Wake-Up Scheduling for Energy-Efficient Mobile Devices," in IEEE Transactions on Wireless Communications, vol. 19, no. 9, pp. 6020-6036, Sept. 2020, doi: 10.1109/TWC.2020.2999339. keywords: {Mobile handsets;Delays;Modems;Power demand;5G mobile communication;Energy consumption;Scheduling;5G;machine learning;wake-up scheme;energy efficiency;scheduling;LSTM},

[12] Van der Sar T. et al. Decoherence-protected quantum gates for a hybrid solid-state spin register //Nature. – 2012. – T. 484. – №. 7392. – S. 82-86.

[13] Bernien H. et al. Probing many-body dynamics on a 51-atom quantum simulator //Nature. – 2017. – T. 551. – №. 7682. – S. 579-584.

[14] Bennett C. H., Brassard G., Crépeau C. et al. Teleporting an unknown quantum state via dual classical and Einstein-Podolsky-Rosen channels // Phys. Rev. Lett. — American Physical Society, 1993. — Vol. 70, Iss. 13. — P. 1895–1899. — ISSN 0031-9007; 1079-7114; 1092-0145 — doi:10.1103/PHYSREVLETT.70.1895 — PMID:10053414

[15] Kelly J. A preview of Bristlecone, Google's new quantum processor (2018) //Google AI Blog (Retrieved 5 January 2019): https://ai. googleblog. com/2018/03/a-preview-of-bristlecone-googles-new. html.

[16] Valiev, K.A., 2005. Quantum computers and quantum computing. Advances in physical sciences, 175 (1), pp.3-39.

[17] Zaharov V. N., Munerman V. I., Samojlova T. A. Parallel'nye metody vyvoda associativnyh pravil v tehnologijah in-database i in-memory //II Mezhdunarodnaja nauchnaja konferencija «Konvergentnye kognitivno-informacionnye tehnologii»: sb. tr. nauch. konf. – 2017. – S. 219-225.

[18] Gendel' E.G., Munerman V.I. Primenenie algebraicheskih modelej dlja sinteza processov obrabotki fajlov – Upravljajushhie sistemy i mashiny, Kiev: Naukova dumka, 1984, 4. – s.69-72.

[19] Gendel' E.G., Munerman V.I., Shkljar B. Sh. Optimizacija processov obrabotki dannyh na baze algebraicheskih modelej – Upravljajushhie sistemy i mashiny, Kiev: Naukova dumka, 1985, 6. – s.91-95.

[20] Munerman V.I. Ob#ektno-orientirovannaja model' massovoj obrabotki dannyh. – M.: Sistemy vysokoj dostupnosti, № 4, t. 7, 2011, s. 72-74.

[21] Draper T. G. Addition on a quantum computer //arXiv preprint quant-ph/0008033. – 2000.

[22] Kvantovye vychislenija protiv klassicheskih: zachem nam stol'ko cifr, blog kompanii Sberbank, matematika: https://habr.com/ru/company/sberbank/blog/343308/

[23] E.F. Codd. Providing OLAP for end-user analysis: An IT mandate. ComputerWorld, 1993.

[24] Munerman V. I. Algebraicheskij podhod k podgotovke dannyh dlja vyvoda associativnyh pravil //Highly available systems Zhurnal vkljuchen v perechen' VAK. – 2017. – S. 34.

[25] Grigor'eva G.M., Mironov A.I., Munerman V.I., Hodchenkov V.Ju. Algoritm slozhenija vektorov na kvantovom komp'jutere // Sistemy komp'juternoj matematiki i ih prilozhenija: materialy XX Mezhdunarodnoj nauchnoj konferencii. – Smolensk: Izdatel'stvo SmolGU, 2019. – Vyp.20. Ch.1 – S.124–128.