

63. *Masaev S.N.* Assessment various control methods a digital copy of enterprise by integral indicator, *Journal of Physics: Conference Series, Krasnoyarsk, Russian Federation, 2020*, pp. 32011. Doi 10.1088/1742-6596/1679/3/032011.
64. *Masaev S.N., Dorrer G.A., Cyganov V.V.* Acceptable area of optimal control for a multidimensional system, *Journal of Physics: Conference Series, Krasnoyarsk, Russian Federation, 2020*, pp. 22091. Doi 10.1088/1742-6596/1679/2/022091.
65. *Masaev S.N.* 2019 Destruction of the Resident Enterprise in the Special Economic Zone with Sanctions Twelfth Int. Conf. "Management of large-scale system development" (MLSD) (Moscow: Russia, IEEE), pp. 1-5. Doi: 10.1109/MLSD.2019.8910997.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н., профессор И.В. Ковалев.

Масаев Сергей Николаевич – Сибирский федеральный университет; e-mail: faberi@list.ru; г. Красноярск, Россия; к.т.н.; доцент.

Masaev Sergei Nikolaevich – Siberian Federal University; e-mail: faberi@list.ru; Krasnoyarsk, Russia; cand. of eng. sc.; assistant professor.

УДК 004.032

DOI 10.18522/2311-3103-2021-3-32-42

С.М. Гушанский, В.И. Божич, В.С. Потапов

РАЗРАБОТКА МЕТОДА ОПТИМИЗАЦИИ И РАСПАРАЛЛЕЛИВАНИЯ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОГО ПРОЦЕССА В РАМКАХ КВАНТОВЫХ УСКОРИТЕЛЕЙ

В последнее время наблюдается стремительный рост интереса к квантовым компьютерам. Их работа основана на использовании для вычислений таких квантово-механических явлений, как суперпозиция и запутывание для преобразования входных данных в выходные, которые реально смогут обеспечить эффективную производительность на 3–4 порядка выше, чем любые современные вычислительные устройства, что позволит решать перечисленные выше и другие задачи в натуральном и ускоренном масштабе времени. Данная статья посвящена решению задачи исследования и разработки методов оптимизации квантовых вычислений в рамках применения квантовых ускорителей. Предложена структурная схема аппаратного ускорителя для увеличения производительности моделируемых квантовых вычислений. Была проведена разработка структурной схемы модуля связи аппаратного ускорителя и программной модели. Актуальность данных исследований заключается в математическом и программном моделировании и реализации корректирующих кодов для исправления нескольких видов квантовых ошибок в рамках разработки и выполнения квантовых алгоритмов для решения классов задач классического характера. Научная новизна данного направления выражается в исключении одного из недостатков квантового вычислительного процесса. Научная новизна данного направления в первую очередь выражается в постоянном обновлении и дополнении поля квантовых исследований по ряду направлений, а компьютерная симуляция квантовых физических явлений и особенностей слабо освещена в мире.

Моделирование; квантовый алгоритм; кубит; модель квантового вычислителя; запутывание; суперпозиция; квантовый оператор; сложность алгоритма.

S.M. Gushanskiy, V.I. Bozhich, V.S. Potapov

DEVELOPMENT OF METHODS OF OPTIMIZATION AND PARALLELIZATION OF COMPUTATIONAL PROCESSES IN QUANTUM ACCELERATORS

Recently, there has been a rapid increase in interest in quantum computers. Their work is based on the use of quantum-mechanical phenomena such as superposition and entanglement for computing to transform input data into outputs that can actually provide effective performance 3–4 orders of magnitude higher than any modern computing devices, which will allow solving the

above and others. tasks in real- and accelerated-time scale. This article is devoted to solving the problem of research and development of methods for optimizing quantum computing within the framework of the application of quantum accelerators. A block diagram of a hardware accelerator is proposed to increase the performance of simulated quantum computing. The development of the structural diagram of the communication module of the hardware accelerator and the software model was carried out. The relevance of these studies lies in mathematical and software modeling and implementation of correction codes for correcting several types of quantum errors in the development and implementation of quantum algorithms for solving classes of problems of a classical nature. The scientific novelty of this direction is expressed in the elimination of one of the disadvantages of the quantum computational process. The scientific novelty of this area is primarily expressed in the constant updating and supplementation of the field of quantum research in a number of areas, and the computer simulation of quantum physical phenomena and features is poorly covered in the world.

Modeling; quantum algorithm; qubit; model of a quantum computer; entanglement; superposition; quantum operator; complexity of the algorithm.

Введение. История компьютерной архитектуры насчитывает несколько десятилетий и постоянно развивается. Важным расширением является появление ускорителей [1] как специализированных процессоров, где главный процессор разгружает подходящие вычислительные задачи. В последнее время исследования компьютерной архитектуры все больше сосредотачиваются на квантовых вычислениях [2]. Квантовый ускоритель основан на идее, что любое конечное приложение содержит несколько вычислительных ядер, и свойства этих частей лучше выполняются с помощью конкретного ускорителя, который может быть либо программируемыми вентилями матрицами [3] (FPGA), либо графическими процессорами [4] (GPU), нейронными процессорами [5] (NPU), такими как тензорный процессор [6] Google (TPU) и т.д.

1. Разработка алгоритма оптимизации. Без оптимизации мы вынуждены производить одно воздействие на квантовый регистра за время $O(2^{4n} + 2^{3n})$ и использовать $O(2^{2n} + 2^n)$ ячеек памяти, n – количество кубит. С оптимизацией количество операций является равным $O(2^{n-1})$, а объем памяти составляет $O(2^n)$. Данный алгоритм хотя и входит в класс NP – сложных алгоритмов, однако его использование предпочтительно.

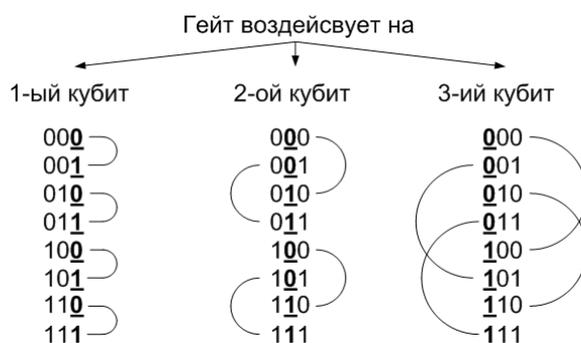


Рис. 1. Последовательность выбора состояний в зависимости от кубита

Как видно данный алгоритм можно распараллелить по принципу SIMD (Single Instruction Multiple Data). Двухкубитовые и трехкубитовые квантовые вентили, как правило, меняют состояния в модели квантового регистра. Для применения данных гейтов также будем использовать алгоритм, который не создает матрицу преобразования, а делает выборку состояний из квантового регистра и меняет их местами. Рассмотрим в качестве примера вентиль CNOT. Исходя из вышеперече-

численных утверждений, можно представить следующий алгоритм для увеличения производительности модели квантового компьютера для многокубитовых операций в виде блок-схемы, показанной на рис. 3. В начале алгоритма воздействия многокубитового вентиля с оптимизацией, представленного на рис. 3, производится инициализация модели квантового регистра, что представляет собой установку амплитуды со значением 1 для одного из состояний регистра. Далее происходит вычисление бинарного индекса кубита (`qubit_binary_index`), который представляет число с установленной единицей в разряде, соответствующем номеру кубита, на который производится воздействие. Затем в цикле происходит обход состояний модели квантового регистра и выборка пары состояний для осуществления воздействия вентиля. Для правильной выборки используется переменная маска (`qubit_mask`), которая при помощи операции конъюнкции фильтрует значения (индексы состояний) таким образом, чтобы соблюдалась последовательность выборки пар состояний. После обхода всех состояний алгоритм завершается. Далее рассмотрим случай применения контролируемого двухкубитового квантового вентиля. Так же, как и в случае с однокубитовыми квантовыми вентилями, размер модели квантового регистра не влияет на результативность алгоритма. Для того чтобы описать всевозможные комбинации контролируемых двухкубитовых вентилях, воспользуемся определением контролируемого U , где U – это матрица 2×2 , соответствующая модели обратимого однокубитового преобразования. Пример выборки (рис. 2) состояний представлен следующим образом:

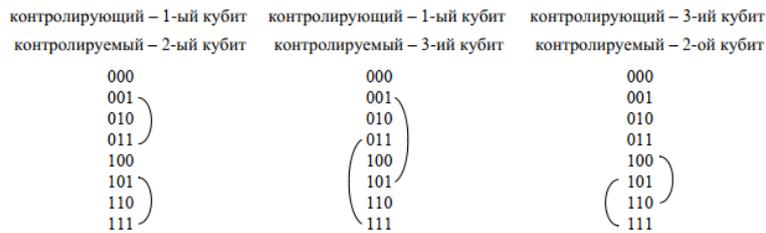


Рис. 2. Пример выборки состояний для двухкубитового универсального контролируемого вентиля

Двухкубитовые и трехкубитовые квантовые вентили, как правило, меняют состояния в модели квантового регистра. Для применения данных гейтов [21] так же будем использовать алгоритм, который не создает матрицу преобразования, а делает выборку состояний из квантового регистра и меняет их местами. Рассмотрим в качестве примера вентиль CNOT. Исходя из вышеперечисленных утверждений, можно представить следующий алгоритм для увеличения производительности модели квантового компьютера для двухкубитовых операций [22] в виде блок-схемы, показанной на рис. 3. Зависимость при выборке пар состояний для двухкубитового контролируемого вентиля может быть отражена с небольшим изменением представленного выше алгоритма.

Как видно из блок-схемы на рис. 3, в случае двухкубитового контролируемого квантового вентиля имеем две переменные, хранящие бинарные индексы контролирующего и контролируемого кубитов. При обходе состояний квантового регистра так же, как и случае с однокубитовыми квантовыми вентилями, выбираются пары состояний. За правильность выборки отвечают две переменные, которые устанавливаются при помощи операции конъюнкции между текущим индексом состояния и бинарным индексом одного из кубитов, участвующих в преобразовании. Также можно проследить отличие алгоритма воздействия двухкубитового вентиля в количестве переменных масок.

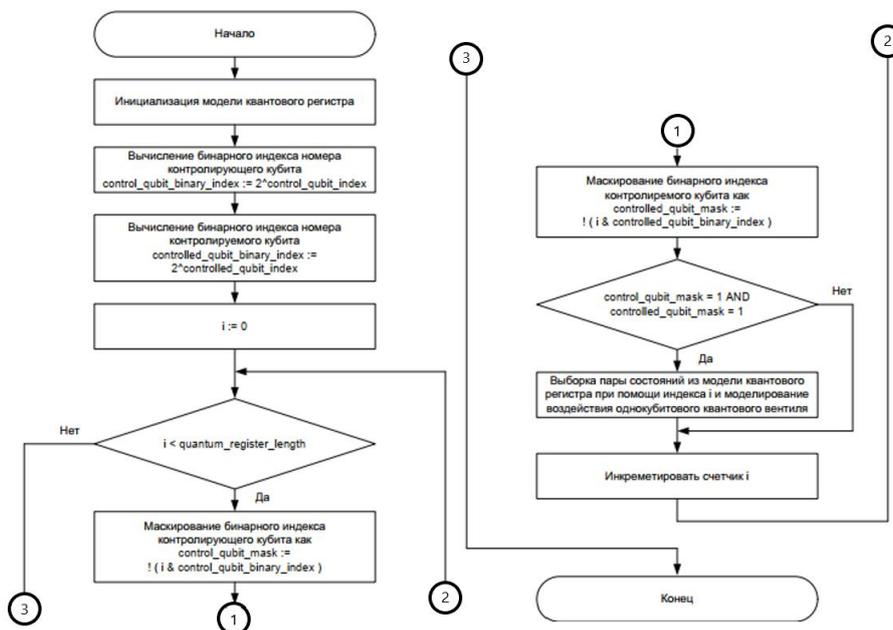


Рис. 3. Блок-схема алгоритма воздействия двухкубитового контролирующего вентиля, используя оптимизацию

Остальные части алгоритма, которые осуществляют непосредственную выборку по сформированным индексам состояний из модели квантового регистра и осуществление преобразования, остаются неизменными.

2. Общая схема аппаратного ускорителя квантовых вычислений. Общая схема аппаратного ускорителя изображена на рис. 4. Блоки «Устройство управления» (УУ) и «Память микропрограммы» (ПМ) являются стандартными при реализации ускорителей. Главными функциями УУ являются осуществление инициализации данных, организация выборки и исполнение команды из ПМ. Также УУ необходимо получать данные извне и правильно их обрабатывать. Однако поскольку существует большое количество интерфейсов, то схема контроллера интерфейса здесь не рассматривается и будем условно предполагать, что данные поступают с шины X, данные на которой формируются контроллером интерфейса ускорителя. Далее следуют блоки специфичные для ускорителя квантовых вычислений, а именно «Блок генерации пар индексов состояний» (БГИС) и «Блок управления АЛУ и выборки состояний из ОЗУ» (БУАиВС). «Блок управления АЛУ и выборки состояний из ОЗУ» (БУАиВС).



Рис. 4. Общая схема аппаратного ускорителя квантовых вычислений

БГИС реализует алгоритм, который ищет последовательность состояний, в зависимости от операции (однокубитовая или многокубитовая) и кубита(ов) на который будет применяться данное воздействие. Сигналы выборки с БГИС поступают на вход БУАиВС, который определяет как наиболее эффективно извлечь данные из «блока ОЗУ» (БО), так как ОЗУ может быть несколько для увеличения производительности и организации параллелизма вычислений.

Блок управления АЛУ и выборки состояний из ОЗУ (УАЛУиВС) является связующим блоком между ОЗУ и блоком параллельных АЛУ. Его графическое изображение представлено на рис. 5.

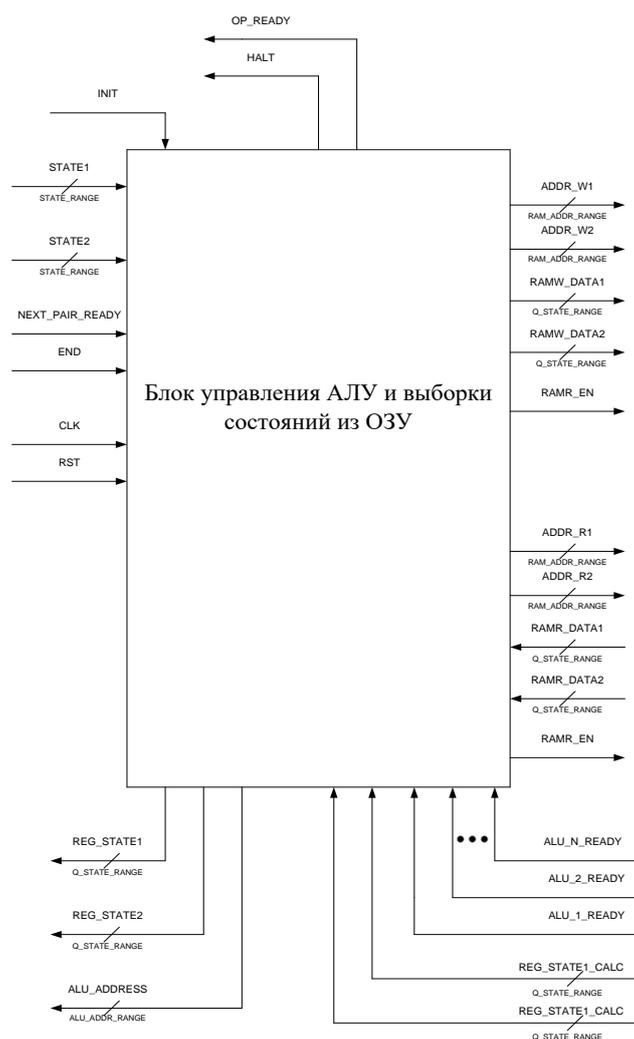


Рис. 5. Графическое представление блока управления АЛУ и выборки состояний из ОЗУ

На вход данного блока поступают сигналы с блока выборки состояний «STATE1» и «STATE2» - пара указателей на состояния в ОЗУ. По данным состояниям блок выборки состояний из ОЗУ формирует адреса, по которым хранятся состояния модели квантового регистра, представленном двухпортовым ОЗУ.

Так как блок параллельных АЛУ функционирует независимо от блока выборки состояний, то необходимо предусмотреть вариант, когда все АЛУ будут заняты вычислениями. Для такой ситуации устанавливается флаг «HALT» для приостановки генерации пар состояний.

Инициализация памяти микропрограммы осуществляется, когда по шине интерфейса начинает поступать информация в виде микрокоманд. После инициализации ПМ блок УУ ожидает сигнала на запуск выполнения микропрограммы. УУ считывает и дешифрирует микрокоманду и в зависимости от типа микрокоманды может генерировать следующие сигналы:

- ◆ сигналы инициализации ОЗУ, хранящее вектор состояний (модель квантового регистра);
- ◆ сигналы, необходимые для вычислений квантового вентиля (вентили могут быть однокубитовыми, двухкубитовыми и трехкубитовыми);
- ◆ сигналы конца вычислений, которые сопровождаются сигналами, инициализирующими считывание вектора состояний, хранящимися в блоке параллельных ОЗУ.

Формат микрокоманды такого ускорителя может быть представлен следующим образом:



Рис. 6. Формат микрокоманды ускорителя

Так как методика аппаратного ускорителя приводится для переменного количества кубитов и вентилях (то есть количество кубитов и операций может быть разным для ускорителей такого типа), дается только формат представления микрокоманды без фиксированного значения полей. Однако поле «Код операции» фиксированной величины 2 бита может содержать следующие значения:

- ◆ «00» – код операции «старт вычислений»; по данной операции происходит инициализации остальных блоков ускорителя;
- ◆ «01» – код операции «квантовый вентиль»; по данной операции происходит дешифрация остальных полей микрокоманды и генерация сигналов, поступающих на блок расчета выборки состояний из ОЗУ.
- ◆ «11» – код операции «конец вычислений»; по данной операции происходит генерация сигналов для выдачи информации с ОЗУ на контроллер шины интерфейса.

3. Вычислительный эксперимент по сравнению процесса моделирования без применения алгоритма оптимизации и с применением. Выполним сравнение процесса моделирования без применения алгоритма оптимизации и с применением такового. Возьмем задачу коммивояжера – комбинацию набора городов и расстояния между каждым двумя городами, чтобы найти тот, у которого наименьшее общее расстояние, пройденное туром, который объезжает все города только один раз и возвращается к месту отправления. Эта проблема относится к классу трудностей NP в теории вычислительной сложности. Квантовый алгоритм оптимизации может быть применим и к классическим вариациям задачи коммивояжера.

При проведении экспериментов получены результаты (рис. 7, 8), отображающие зависимость вероятности ошибки p для идентификации двухбитного оракула k от количества запросов N .

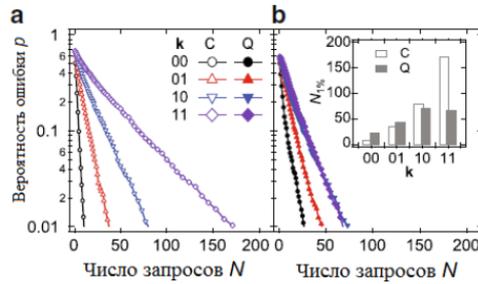


Рис. 7. Диаграмма результатов проведения экспериментов при использовании классического и квантового алгоритма

Также было установлено, что показатель вероятности ошибки $\sim \rho$ при проведении алгоритма оптимизации усредняется по всем n -разрядным оракулам k . Если рассматривать график а, то $n = 2$; если график б, то $n = 3$. Использование аналоговых измерений улучшает показатели работы, как классических, так и квантовых алгоритмов, в сравнении с цифровыми измерениями. Аналоговый преобразователь Q оказывается наиболее эффективным решением. Более того, разрыв между квантовым преобразователем Q и классическим преобразователем C растет с увеличением количества битов n .

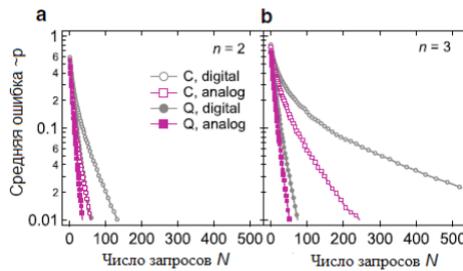


Рис. 8. Диаграмма результатов проведения экспериментов при использовании классического и квантового алгоритма

Таким образом, работа алгоритма оптимизации превосходит в ключевых показателях (например, производительность) работу алгоритмов без оптимизации. Без оптимизации мы вынуждены производить одно воздействие на квантовый регистр за время и использовать ячеек памяти, n – количество кубит. Данный алгоритм хотя и входит в класс NP-сложных алгоритмов, однако его использование предпочтительно.

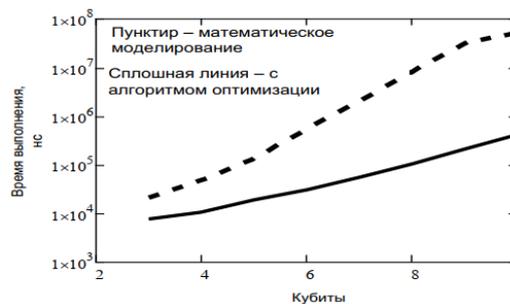


Рис. 9. Результаты моделирования

Заключение. В настоящее время активно развивается теория квантовых вычислений. Несмотря на то, что идея квантового компьютера была высказана еще Р. Фейнманом в 1982 г. и с тех пор проводятся научные исследования по этой тематике, квантовые компьютеры еще не созданы. Однако, уже сейчас ясно, что теоретических ограничений для этого нет. Кроме того, имеются определенные достижения в области теории квантовых вычислений.

В ходе исследования была продемонстрирована возможность ускорения моделирования квантовых вычислений при помощи распределенных вычислений. Данный подход находит своё применение на практике в написании математических ядер [25], которые направлены не только на реализацию моделирования квантовых вычислений, но и на увеличение производительности вычислений и количества моделируемых кубитов.

Благодарности. Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 20-07-00916.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Квантовая криптография // Википедия. – URL: <http://ru.wikipedia.org/?oldid=82377595> (дата обращения: 07.03.2021).
2. Трубицын А.А. Расчет траектории движения материальной точки в двумерном (осесимметричном) консервативном поле // Журнал вычислительной математики и математической физики. – 1990. – Т. 30, № 7. – P. 1113-1115.
3. Arthur Trew (ed.), Greg Wilson (ed.). Past, Present, Parallel: A Survey of Available Parallel Computer Systems. – Springer, 1991. – 392 p. – ISBN 9783540196648.
4. Quantum phase estimation algorithm. (2020, Nov 03). In Wikipedia, The Free Encyclopedia. Retrieved 05:15, July 27, 2020, from https://en.wikipedia.org/w/index.php?Title=Quantum_phase_estimation_algorithm&oldid=731732789.
5. Richard G., Milner A. Short History of Spin // Contribution to the XV International Workshop on Polarized Sources, Targets, and Polarimetry. – Charlottesville, Virginia, USA, September 9-13, 2013. – arXiv:1311.5016.
6. Гушанский С.М., Потапов В.С. Методика разработки и построения квантовых алгоритмов // Информатизация и связь. – 2017. – № 3. – С. 101-104.
7. Гушанский С.М., Поленов М.Ю., Потапов В.С. Реализация компьютерного моделирования системы с частицей в одномерном и двумерном пространстве на квантовом уровне // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2017. – № 3. – С. 223-233.
8. Гушанский С.М., Поленов М.Ю., Потапов В.С. Реализация компьютерного моделирования системы с частицей в одномерном и двумерном пространстве на квантовом уровне // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2017. – № 3. – С. 223-233.
9. Hales S. Hallgren. An improved quantum Fourier transform algorithm and applications // Proceedings of the 41st Annual Symposium on Foundations of Computer Science. – November 12–14 2000. – 515 p.
10. Potapov V., Gushanskiy S., Polenov M. The Methodology of Implementation and Simulation of Quantum Algorithms and Processes // 2017 11th International Conference on Application of Information and Communication Technologies (AICT). – Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2017. – P. 437-441.
11. Ofer Firstenberg, Mikhail D. Lukin. Attractive photons in a quantum nonlinear medium // Nature. – October 2013. – Vol. 502.
12. Нильсен М., Чанг И. Квантовые вычисления и квантовая информация = Quantum Computation and Quantum Information. – М.: Мир, 2006.
13. Quantum programming. (2016, Nov 03). In Wikipedia, The Free Encyclopedia. Retrieved 17:50, September 20, 2016, from https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Quantum_programming&oldid=740376291.
14. Wikipedia contributors. (2018, November 27). IBM Q Experience. In Wikipedia, The Free Encyclopedia. Retrieved 17:28, January 31, 2019, from https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=IBM_Q_Experience&oldid=8708780.

15. Quantum mechanics. (2017, March 29). In Wikipedia, The Free Encyclopedia. Retrieved 15:50, March 30, 2017. – URL: https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Quantum_mechanics&oldid=772744105.
16. Boneh D., Zhandry M. Quantum-secure message authentication codes // In Proceedings of Eurocrypt. – 2013. – P. 592-608.
17. Chris Ferrie. Quantum Physics for Babies. – Brdbk edition. – Sourcebooks Jabberwocky, 2017-05-02. – С. 23. – 24 с. – ISBN 9781492656227.
18. Wilde M. From Classical to Quantum Shannon Theory, arXiv:1106.1445.
19. Гузик В.Ф., Гушанский С.М., Потанов В.С. Количественные характеристики степени запутанности // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2016. – № 3. – С. 76-86.
20. Potapov V., Gushansky S., Guzik V., Polenov M. Architecture and Software Implementation of a Quantum Computer Model // Advances in Intelligent Systems and Computing. – Springer Verlag, 2016. – Vol. 465. – P. 59-68.
21. Томас Х. Кормен, Чарльз И. Лейзерсон, Рональд Л. Ривест, Клиффорд Штайн. Алгоритмы: построение и анализ = Introduction to Algorithms. – 2-е изд. – М.: Вильямс, 2006. – 1296 с. – ISBN 0-07-013151-1.
22. Оптимизация // Википедия [2018–2018]. – URL: <https://ru.wikipedia.org/?oldid=94448419> (дата обращения: 10.08.2018).
23. Bennett C.H., Shor P.W., Smolin J.A., Thapliyal A.V. Entanglement-assisted Capacity of a Quantum Channel and the Reverse Shannon Theorem // IEEE Transactions on Information Theory. – 2002. – Vol. 48. – P. 26-37.
24. Kleppner D., Kolenkow R. An Introduction to Mechanics (Second ed.). – Cambridge: Cambridge University Press, 2014. – 49 p.
25. Потанов В.С., Гушанский С.М. Квантовые типы ошибок и методы их устранения, зависимость ошибки от меры и чистоты запутанности // Сб. трудов XIV Всероссийской научной конференции молодых ученых, аспирантов и студентов ИТСАНУ-2016. – Ростов-на-Дону: Изд-во ЮФУ, 2016. – Т. 3. – С. 123-129.

REFERENCES

1. Kvantovaya kriptografiya [Quantum cryptography], *Vikipediya* [Wikipedia]. Available at: <http://ru.wikipedia.org/?oldid=82377595> (accessed 07 March 2021).
2. Trubitsyn A.A. Raschet traektorii dvizheniya material'noy tochki v dvumernom (osesimmetrichnom) konservativnom pole [Calculation of the trajectory of a material point in a two-dimensional (axisymmetric) conservative field], *Zhurnal vychislitel'noy matematiki i matematicheskoy fiziki* [Journal of Computational Mathematics and Mathematical Physics], 1990, Vol. 30, No. 7, pp. 1113-1115.
3. Arthur Trew (ed.), Greg Wilson (ed.). Past, Present, Parallel: A Survey of Available Parallel Computer Systems. Springer, 1991, 392 p. ISBN 9783540196648.
4. Quantum phase estimation algorithm. (2020, Nov 03). In Wikipedia, The Free Encyclopedia. Retrieved 05:15, July 27, 2020, from https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Quantum_phase_estimation_algorithm&oldid=731732789.
5. Richard G., Milner A. Short History of Spin, *Contribution to the XV International Workshop on Polarized Sources, Targets, and Polarimetry*. Charlottesville, Virginia, USA, September 9-13, 2013. arXiv:1311.5016.
6. Gushanskiy S.M., Potapov V.S. Metodika razrabotki i postroeniya kvantovykh algoritmov [Methods of development and construction of quantum algorithms], *Informatizatsiya i svyaz'* [Informatization and communication], 2017, No. 3, pp. 101-104.
7. Gushanskiy S.M., Polenov M.Yu., Potapov V.S. Realizatsiya komp'yuternogo modelirovaniya sistemy s chastitsey v odnomernom i dvukhmernom prostranstve na kvantovom urovne [Implementation of computer modeling of a system with a particle in one-dimensional and two-dimensional space at the quantum level], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2017, No. 3, pp. 223-233.
8. Gushanskiy S.M., Polenov M.Yu., Potapov V.S. Realizatsiya komp'yuternogo modelirovaniya sistemy s chastitsey v odnomernom i dvukhmernom prostranstve na kvantovom urovne [Implementation of computer modeling of a system with a particle in one-dimensional and two-dimensional space at the quantum level], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2017, No. 3, pp. 223-233.

9. Hales S. Hallgren. An improved quantum Fourier transform algorithm and applications, *Proceedings of the 41st Annual Symposium on Foundations of Computer Science*. November 12–14 2000, 515 p.
10. Potapov V., Gushanskiy S., Polenov M. The Methodology of Implementation and Simulation of Quantum Algorithms and Processes, *2017 11th International Conference on Application of Information and Communication Technologies (AICT)*. Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2017, pp. 437-441.
11. Ofer Firstenberg, Mikhail D. Lukin. Attractive photons in a quantum nonlinear medium, *Nature*, October 2013, Vol. 502.
12. Nil'sen M., Chang I. Kvantovye vychisleniya i kvantovaya informatsiya = Quantum Computation and Quantum Information [Quantum computing and quantum Information = Quantum Computing and Quantum Information]. Moscow: Mir, 2006.
13. Quantum programming. (2016, Nov 03). In Wikipedia, The Free Encyclopedia. Retrieved 17:50, September 20, 2016, from https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Quantum_programming&oldid=740376291.
14. Wikipedia contributors. (2018, November 27). IBM Q Experience. In Wikipedia, The Free Encyclopedia. Retrieved 17:28, January 31, 2019, from https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=IBM_Q_Experience&oldid=8708780.
15. Quantum mechanics. (2017, March 29). In Wikipedia, The Free Encyclopedia. Retrieved 15:50, March 30, 2017. Available at: https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Quantum_mechanics&oldid=772744105.
16. Boneh D., Zhandry M. Quantum-secure message authentication codes, *In Proceedings of Eurocrypt*, 2013, pp. 592-608.
17. Chris Ferrie. Quantum Physics for Babies. Brdbk edition. Sourcebooks Jabberwocky, 2017-05-02, pp. 23, 24 p. ISBN 9781492656227.
18. Wilde M. From Classical to Quantum Shannon Theory, arXiv:1106.1445.
19. Guzik V.F., Gushanskiy S.M., Potapov V.S. Kolichestvennye kharakteristiki stepeni zaputannosti [Quantitative characteristics of the degree of entanglement], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences]*, 2016, No. 3, pp. 76-86.
20. Potapov V., Gushansky S., Guzik V., Polenov M. Architecture and Software Implementation of a Quantum Computer Model, *Advances in Intelligent Systems and Computing*. Springer Verlag, 2016, Vol. 465, pp. 59-68.
21. Tomas Kh. Kormen, Charl'z I. Leyzerson, Ronal'd L. Rivest, Klifford Shtayn. Algoritmy: postroenie i analiz = Introduction to Algorithms [Algorithms: construction and analysis = Introduction to Algorithms]. 2nd ed. Moscow: Vil'yams, 2006, 1296 p. ISBN 0-07-013151-1.
22. Optimizatsiya [Optimization], *Vikipediya [2018–2018]*, [Wikipedia [2018-2018]]. Available at: <https://ru.wikipedia.org/?oldid=94448419> (accessed 10 August 2018).
23. Bennett C.H., Shor P.W., Smolin J.A., Thapliyal A.V. Entanglement-assisted Capacity of a Quantum Channel and the Reverse Shannon Theorem, *IEEE Transactions on Information Theory*, 2002, Vol. 48, pp. 26-37.
24. Kleppner D., Kolenkow R. An Introduction to Mechanics (Second ed.). Cambridge: Cambridge University Press, 2014, 49 p.
25. Potapov V.S., Gushanskiy S.M. Kvantovye tipy oshibok i metody ikh ustraneniya, zavisimost' oshibki ot mery i chistoty zaputannosti [Quantum types of errors and methods of their elimination, the dependence of error on the measure and purity of entanglement], *Sb. trudov XIV Vserossiyskoy nauchnoy konferentsii molodykh uchenykh, aspirantov i studentov ITSAiU-2016* [Proceedings of the XIV All-Russian Scientific Conference of young scientists, postgraduates and students of ITSAiU-2016]. Rostov-on-Don: Izd-vo YUFU, 2016, Vol. 3, pp. 123-129.

Статью рекомендовал к опубликованию к.т.н., доцент М.Ю. Поленов.

Гушанский Сергей Михайлович – Южный федеральный университет; e-mail: smgushanskiy@sfnu.ru; г. Таганрог, Россия; тел.: 88634371656; кафедра вычислительной техники; к.т.н.; доцент.

Потапов Виктор Сергеевич – e-mail: vitya-potapov@rambler.ru; кафедра вычислительной техники; ассистент.

Божич Владимир Иванович – ФГБОУ ВО «РГЭУ (РИНХ)», Таганрогский институт им. А.П. Чехова; e-mail: vladimir.bozhich@gmail.com; г. Таганрог, Россия; тел.: 88634367866; кафедра естественных и безопасности жизнедеятельности; д.т.н.; профессор.

Gushanskiy Sergey Mikhailovich – Southern Federal University; e-mail: smgushanskiy@sfedu.ru; Taganrog, Russia; phone: +78634371656; the department of computer engineering; cand. of eng. sc.; associate professor.

Potapov Victor Sergeevich – e-mail: vitya-potapov@rambler.ru; the department of computer engineering; assistant.

Bozhich Vladimir Ivanovich – FSBEI HE “RSEU (RINH)”, Taganrog Institute A.P. Chekhov, e-mail: vladimir.bozhich@gmail.com; Taganrog, Russia; phone: +78634367866; the department of natural sciences and life safety; dr. of eng. sc.; professor.

УДК 517.656.02

DOI 10.18522/2311-3103-2021-3-42-54

Е.В. Пиневич, Д.С. Алтынов, В.С. Лисовский**ОПТИМИЗАЦИЯ ОРГАНИЗАЦИОННЫХ СТРУКТУР И СОСТАВА ПОДРАЗДЕЛЕНИЙ ТРАНСПОРТНОЙ БЕЗОПАСНОСТИ НА ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОМ ТРАНСПОРТЕ**

Реализована задача, максимизации технико-экономической эффективности и ее применение в целях своевременного и полного выполнения задач по обеспечению устойчивого и безопасного функционирования транспортного комплекса. Целью является нахождение минимального необходимого для перевозок числа человеко-ресурсов. Руководствуясь основными положениями бережливого производства, была реализована задача оптимизации количества трудовых ресурсов. Построена математическая оптимизационная модель штатного расписания для распределения задач штатно-ресурсным единицам для управления перевозочными процессами. Оптимизационная задача решалась с использованием класса интервальных графов с максимальной нагрузкой на один цвет. Для реализации поставленной задачи было создано программное средство, позволяющее использовать для внедрения на производстве, производя расчеты нахождения оптимального количества трудовых ресурсов при заданных граничных условиях, с полной загрузкой системы при максимальной нагрузке определенных цветов в классе графов интервалов. Представленные результаты могут быть использованы как непосредственно самими субъектами транспортной инфраструктуры, так и в системах управления предприятий и организаций, осуществляющих свою деятельность в области обеспечения транспортной безопасности, в агрегаторах грузоперевозок и логистических отделах различных компаний. Возможно построение различных оптимальных вариантов организационных структур и подразделений транспортной безопасности с минимальными затратами на организацию процессов перевозок.

Транспортная безопасность; графы; железнодорожный транспорт; перевозки; транспорт; оптимизация; интервалы; усиление цвета; операции; производительность; бережливое производство; организационные структуры; ресурсы.

E.V. Pinevich, D.S. Altynov, V.S. Lisovsky**OPTIMIZATION OF ORGANIZATIONAL STRUCTURES AND COMPOSITION OF TRANSPORT SECURITY UNITS IN RAILWAY TRANSPORT**

The article implements the task of maximizing the technical and economic efficiency and its application for the timely and complete implementation of tasks to ensure the sustainable and safe functioning of the transport unit. The goal is to find the minimum number of human resources required for transportation. Guided by the main provisions of lean production, the task of optimiz-