

**С.М. Гушанский, Ю.М. Бородянский, В.С. Потапов**

### **РАЗРАБОТКА МИКРОКОМАНД И ОСНОВНЫХ БЛОКОВ АППАРАТНОГО УСКОРИТЕЛЯ КВАНТОВЫХ ВЫЧИСЛЕНИЙ**

*На всех этапах развития информационных технологий уделялось и уделяется в настоящее время большое внимание вопросам моделирования функционирующих специализированных высокопроизводительных вычислительных систем, позволяющих обеспечивать необходимые показатели по быстродействию в сочетании с минимизированными затратами программных ресурсов и потребляемой энергии. Разработанная информационная система, ориентированная на человеко-машинное взаимодействие, позволяет наглядно увидеть сильные и слабые стороны разрабатываемого квантового вычислительного устройства, доказать преимущества его использования. Разрабатываемая моделирующая информационная система является наглядным пособием для понимания основных методов взаимодействия информационных процессов и информационных ресурсов. Ряд важнейших задач не может быть решен с помощью классических вычислительных машин, в том числе, классических суперкомпьютеров, за разумное время. В последнее время наблюдается стремительный рост интереса к квантовым компьютерам. Данная статья посвящена решению задачи исследования и разработки схемы и методики симуляции аппаратного ускорителя квантовых вычислений. Работа затрагивает задачи исследования и разработки методов функционирования квантовых схем и моделей квантовых вычислительных устройств. Актуальность данных исследований заключается в математическом и программном моделировании и реализации основополагающих компонентов моделей квантовых вычислений. Научная новизна данного направления выражается в оптимизации квантового вычислительного процесса. Научная новизна данного направления в первую очередь выражается в постоянном обновлении и дополнении поля квантовых исследований по ряду направлений. Целью работы является реализация методики построения аппаратного ускорителя. Реализовано техническое обеспечение информационной квантовой системы и процессов, в том числе новые программные средства передачи и представления информации. Использование информационной системы квантовых вычислений отличается от своих аналогов существенным увеличением скорости решения вычислительных задач и, самое главное, экспоненциальным увеличением скорости решения NP-полных задач, которые на классических машинах могут решаться за неприемлемое время. В следствии того, что класс NP задач широк, применимость и значимость разработанной методики построения модульной системы квантовых вычислений не вызывает сомнения.*

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

**S.M. Gushanskiy, Yu.M. Borodyansky, V.S. Potapov**

### **DEVELOPMENT OF MICRO-COMMANDS AND BASIC UNITS OF THE HARDWARE ACCELERATOR OF QUANTUM CALCULATIONS**

*At all stages of the development of information technology, much attention has been paid to the issues of modeling functioning specialized high-performance computing systems, which make it possible to provide the necessary performance indicators in combination with minimized costs of software resources and energy consumption. The developed information system, focused on human-machine interaction, allows you to clearly see the strengths and weaknesses of the developed quantum computing device, to prove the advantages of its use. The developed modeling information system is a visual aid for understanding the main methods of interaction between information processes and information resources. A number of the most important problems cannot be solved using classical computers, including classical supercomputers, in a reasonable time. Recently, there has been a surge in interest in quantum computers. This article is devoted to solving the problem of research and development of a circuit and a simulation technique for a hardware accelerator of quantum computing. The work touches upon the problems of research and devel-*

*opment of methods for the functioning of quantum circuits and models of quantum computing devices. The relevance of these studies lies in the mathematical and software modeling and implementation of the fundamental components of quantum computing models. The scientific novelty of this direction is expressed in the optimization of the quantum computational process. The scientific novelty of this area is primarily expressed in the constant updating and supplementing of the field of quantum research in a number of areas. The aim of this work is to implement a technique for constructing a hardware accelerator. The technical support of the information quantum system and processes has been implemented, including new software for the transmission and presentation of information. The use of a quantum computing information system differs from its counterparts by a significant increase in the speed of solving computational problems and, most importantly, by an exponential increase in the speed of solving NP-complete problems that can be solved on classical machines in unacceptable time. Due to the fact that the class of NP problems is wide, the applicability and significance of the developed method for constructing a modular system of quantum computing is beyond doubt.*

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

**Введение.** Происходящий в мире прогресс в области квантовой обработки информации открыл новые перспективы использования квантово-механических явлений для обработки информации. Были разработаны примитивные аналоги квантового компьютера и безопасные квантовые криптографические системы, но пока не создано еще полноценного квантового вычислителя и первоначальной задачей является реализация модели квантового вычислителя и методики его построения с помощью существующих средств.

Наибольшей перспективой среди сверхбыстрых параллельных вычислений является квантовое вычислительное устройство. Идеи по созданию таких типов устройств, которые осуществляют информационную обработку с помощью механизма теории квантовой механики, были высказаны физиком в 1982 г. Р. Фейнманом. Квантовое устройство способно эффективно работать с невыполнимыми для классических ЭВМ задачами за уместное время. Сейчас имеются работающие модели квантового устройства, хотя не все квантовые алгоритмы реализовываются с их помощью. В таких алгоритмах выполняется моделирование на ЭВМ с классической архитектурой. Полезное моделирование квантового вычислительного процесса не возможен на классической ЭВМ из-за самого процесса математического моделирования, носящего экспоненциальный рост.

В свою очередь, в 1994 г. П. Шор показал, как при помощи гипотетически существующего квантового компьютера можно разложить огромные числа на простые сомножители за полиномиальное время. Это событие создало огромный толчок в области квантовых вычислений и его можно назвать отправной точкой, начиная с которой, начали набирать популярность идеи по моделированию квантовых вычислений.

Другим фактором, который вызывает интерес к данной области, является то, что согласно закону Мура, размер транзисторов в микросхемах ЭВМ с каждым годом становится все меньше. Причем уменьшение идет в экспоненциальной прогрессии. Это означает, что через несколько лет, размер транзистора будет сравним с размером атома, где уже не действуют привычные законы физики и приходится пользоваться элементами квантовой механики.

Также на сегодняшний момент предложены варианты физического исполнения квантового компьютера, среди них:

- ◆ квантовый компьютер на ионных ловушках;
- ◆ ядерные магнитно-резонансные квантовые компьютеры;
- ◆ твердотельные квантовые компьютеры на квантовых точках;
- ◆ квантовые компьютеры на сверхпроводниковых элементах.

Однако данные реализации пока не представляют возможности вычисления на них серьезных задач, таких как, упомянутый алгоритм факторизации Шора.

В то же время моделирование квантовых вычислений представляет огромное поле исследований, так как новые квантовые алгоритмы нуждаются в проверке их эффективной работы на квантовом компьютере. Для этой цели создаются симуляторы квантового вычислителя, однако не все из моделей получаются эффективными с точки зрения производительности и объема используемой памяти на классических ЭВМ.

Область моделирования квантовых вычислений на сегодняшний день использует все возможные ресурсы для достижения наибольшей эффективности работы при симуляции процессов квантовых вычислений и затрагивает такие подходы как:

- ◆ моделирование квантовых вычислений на многопроцессорных вычислительных системах;
- ◆ моделирование квантовых вычислений при помощи видеокарт;
- ◆ моделирование на ПЛИС.

Как видно данные подходы к моделированию все больше углубляются в аппаратную часть. Поэтому разработка методики создания аппаратного ускорителя для моделирования квантовых вычислений носит актуальный и перспективный характер, так как заведомо понятно, что при использовании проблемно-ориентированного процессора, или в данном случае ускорителя, задача, для которой он создается, решается в разы быстрее. Понятие же ускоритель, а не процессор, выходит из того, что квантовый процессор теоретически призван не заменять классические ЦПУ, а только увеличить скорость работу для определенного рода задач.

**1. Общая схема аппаратного ускорителя квантовых вычислений.** Данная методика предлагается под действием тех факторов, что сейчас моделирование квантовых вычислений все больше начинает использовать нестандартную аппаратуру для повышения производительности моделей. Совмещая вычислительные возможности проблемно-ориентированной аппаратной части и алгоритмы оптимизации, которые позволяют минимизировать количество обрабатываемых состояний модели квантового регистра предлагается методика, которая позволяет учитывать такие особенности модели квантового компьютера как:

- ◆ работа с комплексными числами;
- ◆ матричные и векторные операции (преобразование при помощи квантовых вентилях);
- ◆ параллелизм вычислений.

Общая схема аппаратного ускорителя изображена на рис. 1. 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).

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 посту-

пают 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.

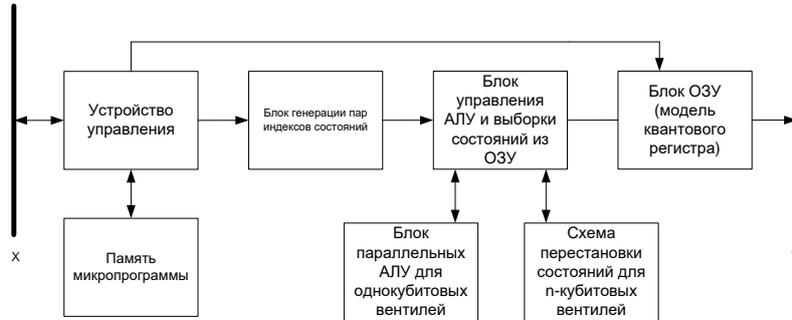


Рис. 1. Общая схема аппаратного ускорителя квантовых вычислений

«Блок параллельных АЛУ» (БПА) и «Схема перестановки состояний» (СПС) осуществляют непосредственно операции над данными, извлеченными из ОЗУ.

По окончании вычислений УУ посылает сигнал в блок ОЗУ для выдачи результата на шину Y. Как и в случае получения данных, шину Y можно рассматривать как контроллер интерфейса, по которому осуществляется связь с ПК.

Методика построения такого рода ускорителя состоит из следующих пунктов.

а) Создание формата данных, который позволит уменьшить количество действий, затрачиваемых на арифметические операции.

б) Применение алгоритма оптимизации для уменьшения действий, связанных с конструированием матрицы преобразования квантового вентиля. Данный алгоритм реализуется в БГИС (рис. 1).

в) Создание блоков БПА и СПС, которые являются основными вычисляющими схемами в структуре ускорителя.

г) Создание схемы управления АЛУ и выборки состояний из ОЗУ, которая позволит делать парную выборку состояний из блока ОЗУ. Можно использовать каскад из двух портовых ОЗУ, для осуществления одновременной выборки пар состояний.

д) Блоки УУ и ПМ являются общими для различных типов ускорителей. Создание данных блоков является типовым, а именно: при запуске вычислений УУ начинает считывать микрокоманду из ПМ и затем, дешифровав ее, передает управляющие сигналы на БГИС.

е) Осуществление инициализации модели квантового регистра. При инициализации модель квантового регистра, в нашем случае ОЗУ или каскад из ОЗУ, принимает вид как показано на рис. 1. Поэтому в качестве начальных данных, которые необходимы для запуска вычислений, следует передать через интерфейс (шина X на рис. 1) номер состояния, который будет равен 1. Остальные состояния следует проинициализировать нулями.

ж) Реализация считывания информации может происходить как на самом ускорителе, так и вне его. При считывании, согласно физике процесса квантовых вычислений, происходит коллапс волновой функции. Поэтому в зависимости от объема оставшегося места на кристалле (ПЛИС или жесткая логика) можно предложить схему осуществляющую последовательность действий, либо передать все данные в виде амплитуд состояний по интерфейсу на управляющий вычислитель.

Основными задачами схемы управляющего устройства (УУ) являются:

♦ инициализация памяти микропрограммы (ПМ), которая поступает с контроллера шины интерфейса;

- ◆ инициализация модели квантового регистра (на рис. 1 блок параллельных ОЗУ);
- ◆ считывание и дешифрация микрокоманд из ПМ;
- ◆ остановка вычислений и генерация сигнала выдачи данных на контроллер шины интерфейса.

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. 2. Формат микрокоманды ускорителя

Так как методика аппаратного ускорителя приводится для переменного количества кубитов и вентилях (т.е. 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 инициализация 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.

Поле «Код вентиля» содержит код операции преобразования или квантовый вентиль. В зависимости от количества кубитов, с которыми вентиль взаимодействует, далее идут 3 поля «Номер кубита». Как правило, основные квантовые вентили содержат не более трех кубитов. Также существует вентили, применяемые ко всему квантовому регистру, например гейт Уолша-Адамара в алгоритме Гровера. Однако такие вентили могут быть представлены в базисе вентилях с меньшим количеством кубитов.

Блок управления АЛУ и выборки состояний из ОЗУ (УАЛУиВС) является связующим блоком между ОЗУ и блоком параллельных АЛУ. Его графическое изображение представлено на рис. 3.

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.

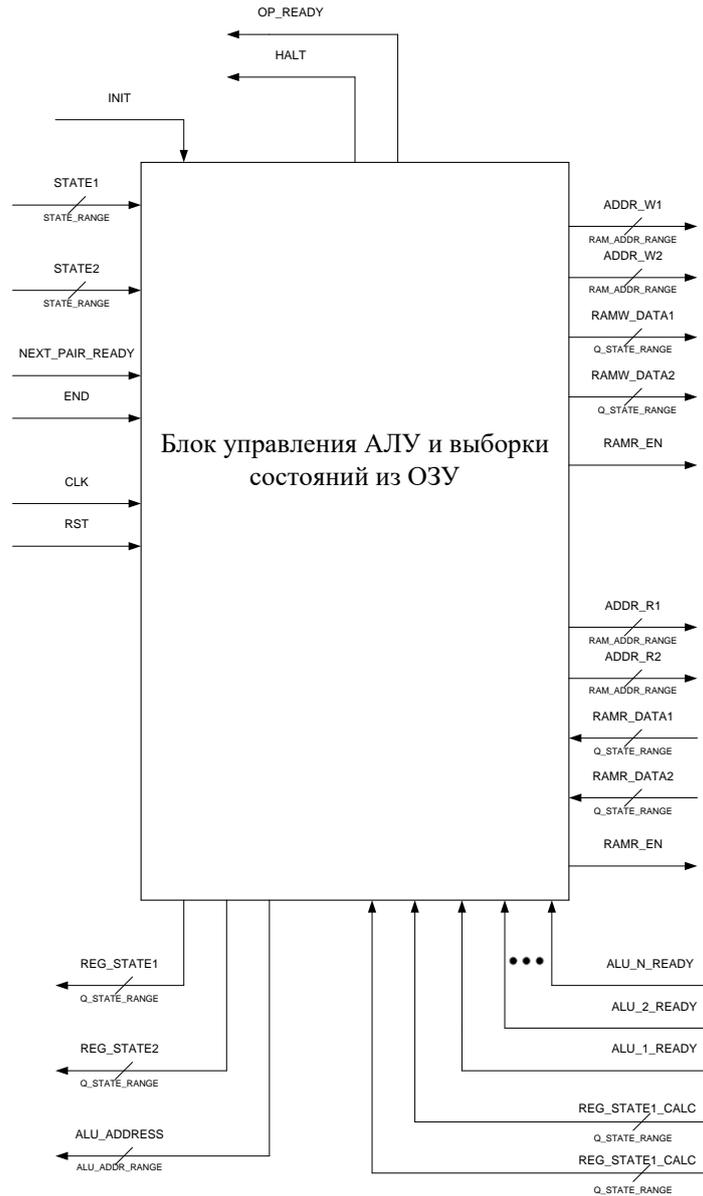


Рис. 3. Графическое представление блока управления АЛУ и выборки состояний из ОЗУ

Для отслеживания занятых АЛУ необходимо иметь в рассматриваемом блоке регистр, каждый бит которого является флагом, сигнализирующем о том занято в данный момент соответствующее АЛУ или нет. Бит устанавливается в 1 при пересылке данных конкретному АЛУ и сбрасывается, если сигнал «ALU\_I\_READY» (I – номер АЛУ) становится равным 1.

Кроме того, в период вычисления определенным АЛУ новых состояний модели квантового регистра, необходимо хранить адреса состояний, которые в данный момент участвуют в вычислениях, для их обратной записи в ОЗУ.

Также данный блок отвечает за инициализацию вектора состояний, который хранится (модель квантового регистра) в ОЗУ. По сигналу INIT блок УАЛУиВС записывает в состояние «STATE1» число 1 в комплексном виде.

**2. Создание схемы вычислений для однокубитовых вентилей.** Для проверки методики синтезируем модель квантового вычислителя, состоящего из 5 кубитов и будем воздействовать на него однокубитовыми преобразованиями согласно последовательности генерации состояний на рис. 4.

Для доказательства работоспособности схемы и для расчета эффективности ускорителя используется САПР Quartus II. Данная САПР позволяет промоделировать поведение синтезируемой схемы на программируемых логических интегральных схемах (ПЛИС). Также будут получены результаты по возможности реализации данного ускорителя на ПЛИС. Схема на уровне регистровых передач представлена с помощью инструмента RTLViewer Quartus II.

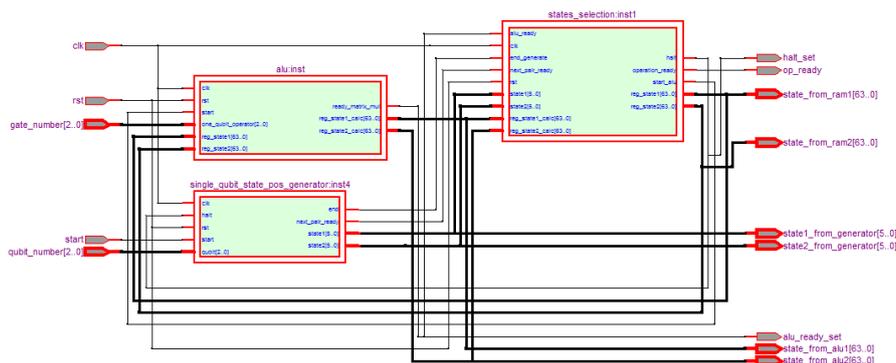


Рис. 4. Схема вычисления однокубитовых операций на уровне регистровых передач

### 3. Синтез блока генерации пар состояний для однокубитовых вентилей.

Для проверки работоспособности блока было проведено его моделирование. Результаты моделирования блока ГСОВ в САПР Quartus II изображены на рис. 5 в виде временной диаграммы.

Как видно из рис. 5 схема генерирует пары индексов состояний по линиям state1 и state2. Промежуток между индексами определяется номером кубита, на который воздействует квантовый вентиль. На временной диаграмме изображен случай, когда кубит под номером 3 подвергается воздействию однокубитового вентиля. При генерации новой пары состояний сигнал next\_pair\_ready устанавливается в единицу, а при окончании вычислений сигнал end.

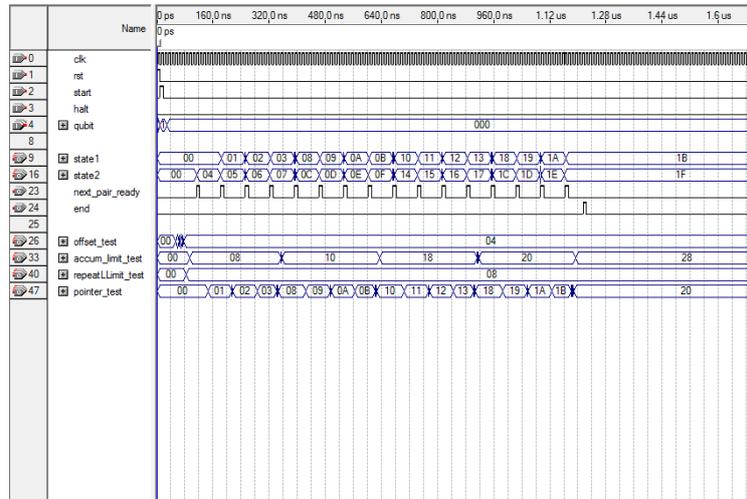


Рис. 5. Временная диаграмма работы блока генерации состояний для однокубитовых вентилей

**Заключение.** Целью работы является реализация методики построения аппаратного ускорителя и его основных компонентов. Основной целью методики, увеличивающей эффективность моделирования, является уменьшение количества данных, которые необходимо обрабатывать при моделировании квантовых вентилей. Алгоритмы теории графов или диаграмм решений мало подходят для данной задачи, так как для их реализации потребуется реализовывать тензорные произведения матриц, что удобнее сделать на программном симуляторе. Также стоит отметить все более растущий интерес к моделированию квантовых вычислений на специальных аппаратных средствах, таких как видеокарты или суперЭВМ. Поэтому представленная в работе методика является актуальной, так как сочетает программные решения в области оптимизации за последние несколько лет и недавно изученные способы моделирования квантовых вычислений.

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

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Raedt K.D., Michielsen K., De Raedt H., Trieu B., Arnold G., Marcus Richter, Th Lip-pert, Watanabe H., and Ito N. Massively parallel quantum computer simulator // Computer Physics Communications. – Vol. 176. – P. 121-136.
2. Boixo S., Isakov S.V., Smelyanskiy V.N., Babbush R., Ding N., Jiang Z., Martinis J.M., and Neven H. Characterizing quantum supremacy in near-term devices. arXiv pre-print arXiv:1608.00263.
3. Stierhoff G.C., Davis A.G. A History of the IBM Systems // Journal In: IEEE Annals of the History of Computing. – Vol. 20, Issue 1. – P. 29-35.
4. Lipschutz S., Lipson M. Linear Algebra (Schaum’s Outlines). – 4th ed. McGraw Hill.
5. Collier David. The Comparative Method. In Ada W. Finifter, ed. Political Sciences: The State of the Discipline II. Washington, DC: American Science Association. – P. 105-119.
6. Vectorization. – <https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Vectorization&id=829988201>.
7. Williams C.P. Explorations in Quantum Computing. Texts in Computer Science. Chapter 2. Quantum Gates. – Springer, 2011. – P. 51-122.
8. Olukotun K. Chip Multiprocessor Architecture – Techniques to Improve Throughput and Latency. – Morgan and Claypool Publishers, 2007.

9. *Potapov V., Guzik V., Gushanskiy S., Polenov M.* Complexity Estimation of Quantum Algorithms Using Entanglement Properties In: Informatics, Geoinformatics and Remote Sensing // Proceedings of 16-th International Multidisciplinary Scientific Geoconference, SGEM 2016, Bulgaria). – Vol. 1. STEF92 Technology Ltd., 2016. – P. 133-140.
10. Inverter (logic gate). – [https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Inverter\\_\(logic\\_gate\)&oldid=844691629](https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Inverter_(logic_gate)&oldid=844691629).
11. *Lachowicz P.* Walsh – Hadamard Transform and Tests for Randomness of Financial Return-Series. – <http://www.quantatrisk.com/2015/04/07/walsh-hadamard-transform-python-tests-for-randomness-of-financial-return-series/>.
12. *Potapov V., Gushanskiy S., Guzik V., Polenov M.* The Computational Structure of the Quantum Computer Simulator and Its Performance Evaluation // In: Software Engineering Perspectives and Application in Intelligent Systems. Advances in Intelligent Systems and Computing. – Springer, 2019. – Vol. 763. – P. 198-207.
13. Quantum phase estimation algorithm. (2016, Nov 03). In Wikipedia, The Free Encyclopedia. Retrieved 05:15, July 27, 2016, from [https://en.wikipedia.org/w/index.php?Title=Quantum\\_phase\\_estimation\\_algorithm&oldid=731732789](https://en.wikipedia.org/w/index.php?Title=Quantum_phase_estimation_algorithm&oldid=731732789).
14. *Richard G. Milner.* A Short History of Spin // Contribution to the XVth International Workshop on Polarized Sources, Targets, and Polarimetry. – Charlottesville, Virginia, USA, September 9-13, 2013. – arXiv:1311.5016.
15. *Гушанский С.М., Потапов В.С.* Методика разработки и построения квантовых алгоритмов // Информатизация и связь. – 2017. – № 3. – С. 101-104.
16. *Гушанский С.М., Поленов М.Ю., Потапов В.С.* Реализация компьютерного моделирования системы с частицей в одномерном и двухмерном пространстве на квантовом уровне // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2017. – № 3. – С. 223-233.
17. *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. – P. 515.
18. *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.
19. 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](https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Quantum_programming&oldid=740376291).
20. 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=87087480](https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=IBM_Q_Experience&oldid=87087480).
21. 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](https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Quantum_mechanics&oldid=772744105).
22. *Boneh D., Zhandry M.* Quantum-secure message authentication codes // In Proceedings of Eurocrypt. – 2013. – P. 592-608.
23. *Potapov V., Gushanskiy 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.
24. *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.
25. *Kleppner D., Kolenkow R.* An Introduction to Mechanics (Second ed.). – Cambridge: Cambridge University Press. – 2014. – 49 p.

## REFERENCES

1. *Raedt K.D., Michielsen K., De Raedt H., Trieu B., Arnold G., Marcus Richter, Th Lip-pert, Watanabe H., and Ito N.* Massively parallel quantum computer simulator, *Computer Physics Communications*, Vol. 176, pp. 121-136.

2. Boixo S., Isakov S.V., Smelyanskiy V.N., Babbush R., Ding N., Jiang Z., Martinis J.M., and Neven H. Characterizing quantum supremacy in near-term devices. arXiv pre-print arXiv:1608.00263.
3. Stierhoff G.C., Davis A.G. A History of the IBM Systems, *Journal In: IEEE Annals of the History of Computing*, Vol. 20, Issue 1, pp. 29-35.
4. Lipschutz S., Lipson M. Linear Algebra (Schaum's Outlines). 4th ed. McGraw Hill.
5. Collier David. The Comparative Method. In Ada W. Finifter, ed. Political Sciences: The State of the Discipline II. Washington, DC: American Science Association, pp. 105-119.
6. Vectorization. Available at: <https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Vectorization&oldid=829988201>.
7. Williams C.P. Explorations in Quantum Computing. Texts in Computer Science. Chapter 2. Quantum Gates. Springer, 2011, pp. 51-122.
8. Olukotun K. Chip Multiprocessor Architecture – Techniques to Improve Throughput and Latency. Morgan and Claypool Publishers, 2007.
9. Potapov V., Guzik V., Gushanskiy S., Polenov M. Complexity Estimation of Quantum Algorithms Using Entanglement Properties In: Informatics, Geoinformatics and Remote Sensing, *Proceedings of 16-th International Multidisciplinary Scientific Geoconference, SGEM 2016, Bulgaria*. Vol. 1. STEF92 Technology Ltd., 2016, pp. 133-140.
10. Inverter (logic gate). Available at: [https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Inverter\\_\(logic\\_gate\)&oldid=844691629](https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Inverter_(logic_gate)&oldid=844691629).
11. Lachowicz P. Walsh – Hadamard Transform and Tests for Randomness of Financial Return-Series. – <http://www.quantatrisk.com/2015/04/07/walsh-hadamard-transform-python-tests-for-randomness-of-financial-return-series/>.
12. Potapov V., Gushanskiy S., Guzik V., Polenov M. The Computational Structure of the Quantum Computer Simulator and Its Performance Evaluation, *In: Software Engineering Perspectives and Application in Intelligent Systems. Advances in Intelligent Systems and Computing*. Springer, 2019, Vol. 763, pp. 198-207.
13. Quantum phase estimation algorithm. (2016, Nov 03). In Wikipedia, The Free Encyclopedia. Retrieved 05:15, July 27, 2016, from [https://en.wikipedia.org/w/index.php?Title=Quantum\\_phase\\_estimation\\_algorithm&oldid=731732789](https://en.wikipedia.org/w/index.php?Title=Quantum_phase_estimation_algorithm&oldid=731732789).
14. Richard G. Milner. A Short History of Spin, *Contribution to the XVth International Workshop on Polarized Sources, Targets, and Polarimetry*. Charlottesville, Virginia, USA, September 9-13, 2013. arXiv:1311.5016.
15. 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.
16. 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 simulation 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.
17. 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*, pp. 515.
18. 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.
19. 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](https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Quantum_programming&oldid=740376291).
20. 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=87087480](https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=IBM_Q_Experience&oldid=87087480).
21. 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](https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Quantum_mechanics&oldid=772744105).

22. Boneh D., Zhandry M. Quantum-secure message authentication codes, *In Proceedings of Eurocrypt*, 2013, pp. 592-608.
23. 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.
24. 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.
25. Kleppner D., Kolenkow R. An Introduction to Mechanics (Second ed.). Cambridge: Cambridge University Press, 2014, 49 p.

Статью рекомендовал к опубликованию д.ф.-м.н., профессор Г.В. Куповых.

**Гушанский Сергей Михайлович** – Южный федеральный университет; e-mail: smgushanskiy@sfedu.ru; 347928, г. Таганрог, пер. Некрасовский, 44; тел.: 88634371656; кафедра вычислительной техники; к.т.н.; доцент.

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

**Бородянский Юрий Михайлович** – Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича; e-mail: borodyanskyum@gmail.com; 193232, Санкт-Петербург, пр. Большевиков, 22, к. 1; к.т.н.; доцент.

**Gushanskiy Sergey Mikhailovich** – Southern Federal University; e-mail: smgushanskiy@sfedu.ru; 44, Nekrasovskiy, Taganrog, 347928, 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.

**Borodyansky Yuri Mikhailovich** – St. Petersburg State University of Telecommunications prof. M.A. Bonch-Bruевич; e-mail: borodyanskyum@gmail.com; 193232, St. Petersburg, pr. Bolshevnikov, 22, build. 1; cand. of eng. sc.; associate professor.

УДК 621.371

DOI 10.18522/2311-3103-2020-6-150-159

**В.П. Можайцев, Д.В. Семенихина**

### **ОЦЕНКА КОЭФФИЦИЕНТА ЭКРАНИРОВАНИЯ ФЮЗЕЛЯЖЕМ КРИТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ В СОСТАВЕ ВОЗДУШНОГО СУДНА**

*Рассматриваются проблемы обеспечения безопасности полета самолетов, использующих электрические / электронные системы, при воздействии высокоинтенсивных электромагнитных полей. Разрабатывается методика анализа воздействия высокоинтенсивных электромагнитных полей, создающих электромагнитную обстановку в зоне нахождения воздушного судна, на базе основных факторов электромагнитной совместимости самолета, таких как электромагнитная обстановка, механизм связи или воздействия, чувствительность или восприимчивость приёмников электромагнитного излучения с пороговыми значениями помех в частотной и временной областях. Анализируются два метода оценки устойчивости самолета к воздействию высокоинтенсивных электромагнитных полей: испытания методом сканирования высокого уровня и испытания методом сканирования низкого уровня. Целью данной статьи является оценка коэффициента экранирования фюзеляжем в местах установки блоков критических систем с помощью программного обеспечения для численного электродинамического моделирования. Задачей исследования является создание и расчет математической модели критической системы в составе воздушного судна. В статье разработаны электродинамические модели критической систе-*