

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

РАЗРАБОТКА КОРРЕКТИРУЮЩИХ КОДОВ ДЛЯ ИСПРАВЛЕНИЯ НЕСКОЛЬКИХ ВИДОВ КВАНТОВЫХ ОШИБОК

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 корректирующих кодов для исправления нескольких видов квантовых ошибок, появляющихся при вычислительных процессах в квантовых алгоритмах и моделях квантовых вычислительных устройств. Целью работы является изучение существующих методов исправления различных видов и типов квантовых ошибок и создание 3-кубитного корректирующего кода для квантового исправления ошибок. 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 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. Целью работы является компьютерное моделирование квантового вычислительного процесса с использованием метода исправления фазовых типов ошибок, который позволяет оценить собственную фазу унитарного гейта, получившего доступ к квантовому состоянию, пропорционально собственному вектору.

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

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

DEVELOPMENT OF CORRECTION CODES FOR CORRECTING SEVERAL KINDS OF QUANTUM ERRORS

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 input data into output data that can actually provide effective performance 3 to 4 orders of magnitude higher than any modern computing devices, which will solve the above and others tasks in a natural and accelerated time scale. This article is devoted to solving the problem of research and development of corrective codes for correcting several types of quantum errors that appear during computational processes in quantum algorithms and models of quantum computing devices. The aim of the work is to study existing methods for correcting various types and types of quantum errors and to create a 3-qubit corrective code for quantum error correction. The work touches upon the tasks of research and development of the functioning methods of quantum circuits and models of quantum computing devices. The relevance of these studies lies in the mathematical and software modeling and implementation of corrective codes for correcting several types of quantum errors as part of the development and implementation of quantum algorithms for solving classes of classical problems. The scientific novelty of this area is expressed in the exclusion of one of the shortcomings of the quantum computing process. The scientific novelty of this area is primarily expressed in the constant updating and addition of the field of quantum research in a number of areas, and computer simula-

tion of quantum physical phenomena and features is poorly illuminated in the world. The aim of the work is computer simulation of a quantum computing process using the method of correcting phase types of errors, which allows one to evaluate the own phase of a unitary gate that has gained access to the quantum state in proportion to its own vector.

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

Введение. В современной науке и технике постоянно возникает необходимость в решении таких стратегически важных задач, как предсказание погоды и расчет климатических изменений, создание онкологических препаратов, обработка сигналов из Вселенной для поиска внеземных цивилизаций, обработка символической информации, криптоанализ [1], опережающий расчет траекторий движущихся воздушных и космических объектов [2] и другие задачи. Практическая реализация перечисленных задач на современных, даже суперкомпьютерных [3], системах требует недопустимо большого промежутка времени или вообще невозможна.

Для квантовых вычислений необходимы только конечномерные квантовые системы, и для этого достаточно рассмотрения комплексных векторных пространств со скалярным произведением – евклидовых пространств [4].

Состояние квантовой системы и их преобразования можно описать посредством векторов и матриц или, используя более компактные бра и кет обозначения, введенные Дираком [5]. Кет-векторами $|x\rangle$ [6] обозначают векторы-столбцы и обычно используют для описания квантовых состояний [7]. Введенные в предыдущем разделе функции $|0\rangle$ и $|1\rangle$ как раз и являются кет-векторами. Парными бра-векторами $\langle x|$ обозначают сопряжение и транспонирование кет-векторов $|x\rangle$. Иными словами, векторы $|0\rangle, \langle 0|, |1\rangle, \langle 1|$ в матричной форме представляются следующим образом:

$$|0\rangle = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix}, \langle 0| = [1 \ 0], \quad |1\rangle = \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix}, \langle 1| = [0 \ 1]. \quad (1)$$

1. Теория квантовых ошибок. В силу специфики пространства состояний кубита [8], считается, что его взаимодействие с окружающей средой может привести к ошибке одного из трех возможных типов:

1) битовые ошибки, приводящие к перебору кубита $|0\rangle \rightarrow |1\rangle, |1\rangle \rightarrow |0\rangle$. Их иначе еще называют X – ошибками, так как их можно представить, как результат произведения матрицы Паули [9] (x) и вектора состояния кубита;

2) фазовые ошибки, приводящие к перевороту фазы кубита $|0\rangle \rightarrow |0\rangle, |1\rangle \rightarrow |1\rangle$. Их называют Z – ошибками (соответствующая матрица Паули (z));

3) смешанные битофазовые ошибки, приводящие одновременно и к перебору кубита и перевороту фазы $|0\rangle \rightarrow |1\rangle, |1\rangle \rightarrow |0\rangle$. Их называют Y – ошибками (соответствующая матрица Паули (y)).

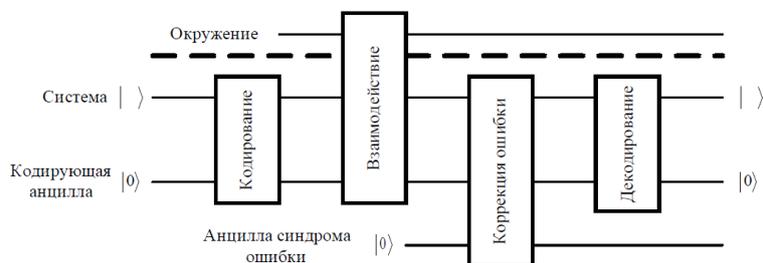


Рис. 1. Базовая схема построения квантовых кодов коррекции

Исправление фазовых ошибок. Классического аналога фазовой ошибки не существует, однако фазовую ошибку возможно трансформировать в классическую. Рассмотрим базис $|+\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}} * (|0\rangle + |1\rangle)$, $|-\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}} * (|0\rangle - |1\rangle)$. Оператор фазовой [10] ошибки Z транслирует $|+\rangle$ в $|-\rangle$ и наоборот. Аналогичным образом действует оператор X в базисе $|0\rangle, |1\rangle$. Используя этот факт, скорректировать или исправить данный тип ошибки можно с помощью трехкубитового кодирования: $|0\rangle \rightarrow |+++ \rangle, |1\rangle \rightarrow |-- \rangle$. Используя схему коррекции, легко составить схему исправления фазовой ошибки (рис. 2).

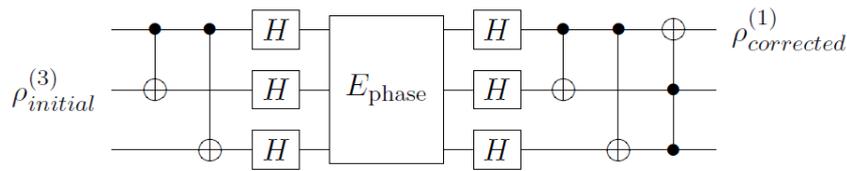


Рис. 2. Схема исправления фазовой ошибки

Зависимость меры декорентности [11] от зашумленности в одном кубите [12] в случае фазовой ошибки будет совпадать со случаем классической ошибки. В соответствии с вышеописанным материалом получаем зависимость ошибки E от меры и чистоты запутанности [13], где значение квантовой ошибки складывается из искажения данных I , зашумленности квантовых состояний Z и декогеренции D : $\sum (I + Z + D) = E$

Система оценок количественных характеристик запутанности. Для реализации преимуществ квантовых вычислений перед классическими, необходимы задачи, с которыми классические вычислительные машины не справляются. Речь идет не о принципиальной "нерешаемости" задачи, а о времени, необходимом им на это решение. Если оно превосходит разумный предел (скажем, один год), то задача считается неразрешимой.

Для количественной характеристики запутанности состояния важное значение имеет понятие меры запутанности. Эта мера E должна удовлетворять следующим условиям:

1. Вариативность относительно локальных [14] квантовых операций (W);
2. Непрерывность (N) [15];

В нерелятивистской квантовой механике [16] сохранение вероятности приводит к уравнению непрерывности. Пусть $P(x, t)$ – плотность вероятности, J – поток вероятности, тогда уравнение запишется в виде

$$\text{div}J + \frac{\partial}{\partial t} P(x, t) = 0.$$

3. Аддитивность (A) [17]. Если существует более одной копии системы, то необходимо выполнение следующего условия:

$$E(|\psi_{AB}\rangle \otimes |\varphi_{AB}\rangle) = E(|\psi_{AB}\rangle) + E(|\varphi_{AB}\rangle).$$

Также важным считается свойство аддитивности $E(|\psi\rangle \otimes |\varphi\rangle) = E(|\psi\rangle) + E(|\varphi\rangle)$, которое может быть сформулировано в двух вариантах:

1. Аддитивность в смысле добавления кубитов. Состояния $|\Psi\rangle$ и $|\varphi\rangle$ находятся в пространствах $H_1 \otimes \dots \otimes H_n$ и $H_{n+1} \otimes \dots \otimes H_{n+k}$, соответственно. Тогда

состояние $|\Psi\rangle \otimes |\varphi\rangle$ описывается в пространстве $H_1 \otimes \dots \otimes H_n \otimes H_{n+1} \otimes \dots \otimes H_{n+k}$ и его запутанность рассматривается между подсистемами $H_1, \dots, H_n, H_{n+1}, \dots, H_{n+k}$. Таким образом, количество кубитов складывается.

2. Аддитивность в смысле расширения пространства [18]. Состояния $|\Psi\rangle$ и $|\varphi\rangle$ находятся в пространствах $H_1 \otimes \dots \otimes H_n$ и $H'_1 \otimes \dots \otimes H'_n$. Тогда состояние $|\Psi\rangle \otimes |\varphi\rangle$ рассматривается в пространстве $(H_1 \otimes H'_1) \otimes (H_2 \otimes H'_2) \otimes \dots \otimes (H_n \otimes H'_n)$, а запутанность рассматривается между подсистемами [19] $H_1 \otimes H'_1, H_2 \otimes H'_2, \dots, H_n \otimes H'_n$. В данном случае перемножаются размерности [20] соответствующих кубитов, происходит расширение пространства состояний кубитов. В соответствии с вышеописанными характеристиками была сформирована система [21] оценок количественных характеристик запутанности:

$$\left\{ \begin{array}{l} W, \text{ где } 1 < W < \infty \\ \operatorname{div} J + \frac{\partial}{\partial t} P(x, t) = 0 \\ A \equiv E(|\psi_{AB}\rangle \otimes |\varphi_{AB}\rangle) = E(|\psi_{AB}\rangle) + E(|\varphi_{AB}\rangle) \end{array} \right.$$

Исходя из данной системы, необходимым и достаточным набором условий успешной реализации квантовой запутанности для дальнейшей работы квантовых алгоритмов [22] и вычислений является выполнение одновременно всех строк системы. Наибольшей важностью отличается условие непрерывности [23], необходимость непрерывного изменения некоторой величины. В данном случае речь идет о квантовом состоянии и процессе его получения, для которого неожиданная остановка процесса измерения (изменения) аналогична ошибке на выходе системы. Также не менее важным условием является аддитивность. В квантовой механике аддитивность величины означает, что величина, относящаяся к квантовой системе в целом, равна сумме величин, относящихся к её составным частям. Свойство аддитивности для некоторых физических величин эквивалентно принципу суперпозиции.

Заключение. Квантовая коррекция ошибок [24] используется для защиты информации в квантовой связи (где квантовые состояния проходят через шумные каналы) и квантовые вычисления (где квантовые состояния преобразуются через последовательность несовершенных вычислительных шагов в присутствии декогеренции [25] окружающей среды для решения вычислительной задачи). В квантовой обработке информации эволюция времени квантового вычислительного процесса обычно рассматривается как дискретная, представление полной эволюции квантовой системы за конечный интервал времени (например, один вычислительный шаг).

Благодарности. Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ, грант № НК 20-07-00368.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Квантовая криптография // Википедия. – URL: <http://ru.wikipedia.org/?oldid=82377595> (дата обращения: 07.03.2017).
2. Трубицын А.А. Расчет траектории движения материальной точки в двумерном (осесимметричном) консервативном поле // Вычислительная математика и математическая физика. – 1990. – Т. 30:7. – С. 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. (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.
5. *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.
6. *Гушанский С.М., Потанов В.С.* Методика разработки и построения квантовых алгоритмов // Информатизация и связь. – 2017. – № 3. – С. 101-104.
7. *Гушанский С.М., Поленов М.Ю., Потанов В.С.* Реализация компьютерного моделирования системы с частицей в одномерном и двухмерном пространстве на квантовом уровне // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2017. – № 6 (191). – С. 223-233.
8. *Гузик В.Ф., Гушанский С.М., Поленов М.Ю., Потанов В.С.* Понятие и структура квантового алгоритма // Информатизация и связь. – 2016. – № 1. – С. 35-39.
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. Attractive photons in a quantum nonlinear medium. Ofer Firstenberg, Mikhail D. Lukin. 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=87087480.
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. – Brdtk edition. – Sourcebooks Jabberwocky, 2017-05-02. – P. 23-24. – 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 (176). – 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. – С. 1296. – ISBN 0-07-013151-1.
22. Оптимизация // Википедия. [2018–2018]. Дата обновления: 10.08.2018. – 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 2017).
2. *Trubitsyn A.A.* Raschet traektorii dvizheniya material'noy toчки v dvumernom (osesimmetrichnom) konservativnom pole [Calculation of the trajectory of a material point in a two-dimensional (axisymmetric) conservative field], *Vychislitel'naya matematika i matematicheskaya fizika* [Computational mathematics and mathematical physics], 1990, Vol. 30:7, 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. (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.
5. *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.
6. *Gushanskiyyu S.M., Potapov V.S.* Metodika razrabotki i postroeniya kvantovykh algoritmov [Method 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 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. 6 (191), pp. 223-233.
8. *Guzik V.F., Gushanskiy S.M., Polenov M.Yu., Potapov V.S.* Ponyatie i struktura kvantovogo algoritma [The concept and structure of a quantum algorithm], *Informatizatsiya i svyaz'* [Informatization and communication], 2016, No. 1, pp. 35-39.
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. Attractive photons in a quantum nonlinear medium. Ofer Firstenberg, Mikhail D. Lukin. 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=87087480.
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, P. 23-24. ISBN 9781492656227.
18. *Wilde M.* From Classical to Quantum Shannon Theory, arXiv:1106.1445.
19. *Guzik V.F., Gushanskiy S.M., Potapov V.S.* Kolichestvennyye kharakteristiki stepeni zaputannosti [Quantitative characteristics of the degree of entanglement], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2016, No. 3 (176), 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, pp. 1296. ISBN 0-07-013151-1.
22. Optimizatsiya [Optimization], Vikipediya [Wikipedia]. [2018–2018]. Data obnovleniya: 10.08.2018. 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 errors 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. М.Ю. Поленов.

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.

Потанов 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; 347928, г. Таганрог, ул. Инициативная, 48; тел.: 88634367866; кафедра естествознания и безопасности жизнедеятельности; д.т.н.; профессор.

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.

Bozhich Vladimir Ivanovich – FSBEI HE “RSEU (RINH)”, Taganrog Institute A.P. Chekhov, e-mail: vladimir.bozhich@gmail.com; 347928, Taganrog, st. Initiative, 48; phone: 88634367866; the department of natural sciences and life safety; dr. of eng. sc.; professor.

УДК 681.3.05

DOI 10.18522/2311-3103-2020-3-46-55

С.И. Клевцов

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ХАРАКТЕРА ИЗМЕНЕНИЙ ПАРАМЕТРА НА ОСНОВЕ АНАЛИЗА ДИНАМИКИ ФОРМЫ СОВОКУПНОСТИ ЕГО ЗНАЧЕНИЙ В РЕАЛЬНОМ ВРЕМЕНИ

Одной из важных задач мониторинга технических объектов является предотвращение аварийных ситуаций. Эта задача связана с выполнением достоверной и адекватной оценки работоспособности объекта. Оценка работоспособности объекта основывается на анализе поведения его контролируемых параметров в реальном времени. Тогда она будет актуальной. В работе предложен метод определения характера изменения параметра, основанный на анализе последовательности специальных пространственных графических форм, называемых графиками Пуанкаре. Выбранный параметр должен в значительной степени определять работоспособность контролируемого объекта. Графики формируются на основе временного ряда контролируемого параметра. Выбирается временное