

УДК: 004.89

**Худайберидева Г. Б., магистр, ассистент кафедры
«Информатика и информационные технологии»
Московский Политехнический Университет,
Россия, г. Москва**

**Кожухов Д. А., магистр, ассистент кафедры
«Информатика и информационные технологии»
Московский Политехнический Университет,
Россия, г. Москва**

**Пименкова А. А., студент-бакалавр кафедры
«Информатика и информационные технологии»
Московский Политехнический Университет,
Россия, г. Москва**

ТОПОЛОГИЧЕСКИЕ КВАНТОВЫЕ ХОДЫ ДЛЯ ОПТИМИЗАЦИИ БИЗНЕС-ПРОЦЕССОВ: ПРЕДСТАВЛЕНИЕ РАБОЧИХ ПОТОКОВ КАК МНОГОМЕРНЫХ ТОПОЛОГИЧЕСКИХ МНОГООБРАЗИЙ

Аннотация: статья предлагает принципиально новый подход к оптимизации сложных бизнес-процессов, в частности в ИТ-сфере, основанный на синтезе методов топологического анализа данных и парадигм квантовых вычислений. Традиционные линейные модели процессов признаются недостаточными для описания их истинной сложности и взаимозависимостей. В качестве альтернативы предлагается репрезентация бизнес-процессов в виде динамических многомерных топологических многообразий, где компоненты процесса и их взаимосвязи формируют нетривиальную геометрическую структуру. Ключевым элементом подхода является адаптация концепции квантовых ходов для поиска оптимальных траекторий в этих топологических пространствах. Разрабатывается теоретическая основа "топологического квантового отжига", направленного на минимизацию "энтропии процесса" как метрики неэффективности путем достижения энергетического

минимума системы. Данная концепция открывает путь к глобальной оптимизации процессов, учитывающей нелинейные эффекты и скрытые паттерны, недоступные классическим алгоритмам.

Ключевые слова: топологический анализ данных, квантовые вычисления, оптимизация бизнес-процессов, квантовые ходы, топологическое многообразие, квантовый отжиг, энтропия процесса, нелинейные системы, ИТ-процессы.

Khudaiberideva G. B.

**master and department assistant at the department of
"Computer Science and Information Technology"
Moscow Polytechnic University
Moscow, Russia**

Kozhukhov D. A.

**master and department assistant at the department of
"Computer Science and Information Technology"
Moscow Polytechnic University
Moscow, Russia**

Pimenkova A. A.

**bachelor's student at the department of
"Computer Science and Information Technology"
Moscow Polytechnic University
Moscow, Russia**

**TOPOLOGICAL QUANTUM MOVES FOR OPTIMIZING BUSINESS
PROCESSES: REPRESENTING WORK FLOWS AS
MULTIDIMENSIONAL TOPOLOGICAL MANIFOLDS**

Annotation: Tatiana offers a fundamentally new approach to optimizing complex business processes, particularly in the IT field, based on a synthesis of topological data analysis methods and quantum computing paradigms. Traditional linear models of processes

are considered insufficient to describe their true complexity and interdependencies. As an alternative, the representation of business processes in the form of dynamic multidimensional topological manifolds is proposed, where the components of the process and their interrelationships form a non-trivial geometric structure. A key element of the approach is to adapt the concept of quantum moves to find optimal trajectories in these topological spaces. The theoretical basis of "topological quantum annealing" is being developed, aimed at minimizing the "entropy of the process" as a metric of inefficiency by achieving an energy minimum of the system. This concept opens the way to global process optimization that takes into account nonlinear effects and hidden patterns that are inaccessible to classical algorithms.

***Keywords:** topological data analysis, quantum computing, business process optimization, quantum moves, topological diversity, quantum annealing, process entropy, nonlinear systems, IT processes.*

Введение

Оптимизация бизнес-процессов остается критически важной задачей для повышения эффективности, снижения издержек и обеспечения конкурентоспособности организаций, особенно в динамичной сфере информационных технологий [1]. Классические подходы, базирующиеся на линейных моделях процессов (таких как последовательности задач в нотации BPMN), часто демонстрируют ограниченную эффективность при работе со сложными, распределенными и нелинейными системами [2]. Эти методы преимущественно фокусируются на идентификации и устранении локальных "узких мест" (bottlenecks), не учитывая в полной мере глобальную структуру взаимозависимостей между компонентами процесса и возникающие при этом нелинейные эффекты распространения изменений [3]. Указанные ограничения стимулируют поиск принципиально новых теоретических оснований и математических аппаратов для моделирования и оптимизации бизнес-процессов. Инновационность предлагаемого подхода заключается в радикальном переосмыслении природы бизнес-процессов через призму современной

топологии и квантовой информатики, что позволяет преодолеть ограниченность линейных моделей [4].

Бизнес-процессы как топологические многообразия

Современные бизнес-процессы, особенно в ИТ-домене (разработка ПО, эксплуатация сложных инфраструктур, управление сетевыми сервисами), характеризуются высокой степенью взаимосвязанности компонентов, параллелизмом исполнения, наличием множества обратных связей и распределенностью ресурсов и ответственности [5]. Адекватное описание такой сложной структуры требует выхода за рамки одномерных или двумерных представлений. Концепция топологического многообразия, фундаментальная в современной геометрии и физике, предоставляет мощный формализм для репрезентации сложных систем [6]. В рамках предлагаемого подхода бизнес-процесс интерпретируется как динамическое многомерное топологическое многообразие. Каждая точка этого многообразия соответствует определенному состоянию процесса. Размерность пространства определяется количеством ключевых параметров, описывающих состояние: вовлеченные ресурсы (люди, вычислительные мощности, данные), текущие задачи, их статусы, временные метки, метрики производительности, условия внешней среды [7]. Многообразие не является статичным; его геометрия эволюционирует во времени под влиянием исполнения задач, решений участников процесса и внешних событий. Взаимозависимости между задачами, ресурсами и подпроцессами формируют сложную топологическую структуру, включающую особенности, такие как "складки", "петли" обратных связей и области высокой "кривизны", где малые изменения состояния процесса приводят к значительным последствиям для всей системы [8]. Именно эти топологические особенности часто коррелируют с зонами неэффективности или риска. Традиционные методы, оперирующие

упрощенными графами зависимостей, не способны в полной мере уловить и количественно описать эти многомерные структуры.

Квантовые ходы как инструмент навигации в топологическом пространстве процессов

Задача оптимизации бизнес-процесса в рамках предложенной модели сводится к поиску оптимальной траектории в сложном многомерном топологическом пространстве состояний от начальной точки (вход процесса) до целевой точки (успешное завершение процесса с требуемыми характеристиками) [9]. Классические алгоритмы поиска кратчайших путей или градиентного спуска сталкиваются с экспоненциальным ростом вычислительной сложности при увеличении размерности пространства и количества локальных минимумов, соответствующих субоптимальным конфигурациям процесса [10]. Квантовые ходы представляют собой квантово-механические аналоги классических случайных блужданий, где "ходок" (walker) существует в суперпозиции множества состояний и перемещается согласно эволюции, определяемой гамильтонианом системы [11]. Эта фундаментальная способность квантовых систем находиться в когерентной суперпозиции состояний и проявлять интерференционные эффекты лежит в основе потенциального квантового ускорения для задач поиска и оптимизации [12]. В контексте модели бизнес-процесса как топологического многообразия, квантовый ходок может исследовать множество потенциальных траекторий развития процесса одновременно. Эволюция квантового ходка определяется топологией многообразия (через структуру связности состояний) и "энергетическим ландшафтом", на котором потенциальная энергия каждой точки соответствует метрике неэффективности данного состояния процесса (например, совокупным временным или ресурсным затратам) [13]. Квантовые ходы, особенно в непрерывной или дискретной форме на графах, демонстрируют способность быстрее исследовать сложные пространства, избегая застревания в локальных минимумах благодаря туннелированию и интерференции, что теоретически обеспечивает преимущество перед

классическими стохастическими методами для поиска глобально оптимальных конфигураций [14].

Топологический квантовый отжиг и минимизация энтропии процесса

Для достижения глобального оптимума в сложном энергетическом ландшафте, присущем топологическому многообразию бизнес-процесса, предлагается адаптация протокола квантового отжига [15]. Квантовый отжиг использует квантовые флуктуации (управляемые параметром, аналогичным температуре в классическом отжиге) для поиска основного состояния (глобального минимума энергии) системы [16]. В рамках предложенной концепции "топологического квантового отжига" для бизнес-процессов, система иницируется в простом начальном состоянии на многообразии с высоким уровнем управляемых квантовых флуктуаций. Затем, по аналогии с адиабатической теоремой квантовой механики, система медленно эволюционирует (осуществляется "охлаждение") путем уменьшения квантовых флуктуаций при одновременной "настройке" гамильтониана, отражающего целевую функцию оптимизации – минимизацию затрат или максимизацию эффективности [17]. Критически важным является введение понятия "топологической энтропии процесса". Эта метрика количественно характеризует степень неупорядоченности, сложности и неэффективности процесса в рамках его топологической модели [18]. Высокая энтропия процесса соответствует состояниям с большим количеством конфликтующих зависимостей, неоптимальным распределением ресурсов, избыточными циклами обратной связи или высокой чувствительностью к возмущениям, что топологически проявляется как сложная, "искривленная" структура многообразия в данной области. Целью топологического квантового отжига является именно минимизация этой энтропии процесса путем нахождения конфигурации с минимальной энергией, то есть наиболее "гладкой" и оптимальной траектории в топологическом пространстве [19]. Данный

подход принципиально отличается от традиционных методов оптимизации, так как оперирует целостной глобальной структурой процесса, а не последовательной локальной настройкой его частей.

Теоретические основания и потенциал метода

Теоретическую основу предложенного подхода составляют синтез идей из топологического анализа данных [20], теории квантовых вычислений [21] и теории сложных систем [22]. Адаптация математического аппарата квантовой механики на многообразиях [23] и теории квантовых ходов на графах [24] к задачам моделирования бизнес-процессов требует разработки специализированных формализмов. Ключевым шагом является корректное определение гамильтониана системы, который должен кодировать как топологию многообразия (структуру связей между состояниями процесса), так и целевую функцию оптимизации (например, функцию стоимости или времени) [25]. Введение понятия топологической энтропии процесса требует строгого математического определения, возможно, на основе обобщений понятий энтропии в теории информации или статистической механике применительно к геометрии состояния процесса на многообразии [26]. Потенциал метода заключается в преодолении фундаментальных ограничений классической оптимизации для процессов с высокой степенью нелинейности и взаимозависимостей. Способность квантовых ходов к быстрому исследованию сложных пространств состояний и свойство квантового отжига избегать локальных минимумов через туннелирование теоретически позволяет находить глобально оптимальные конфигурации процессов, которые остаются недоступны для классических алгоритмов, работающих за полиномиальное время [27]. Это особенно актуально для крупномасштабных ИТ-процессов с тысячами взаимосвязанных задач и ресурсов, где классические методы часто дают лишь локально улучшенные, но субоптимальные решения [28].

Предложенный подход обеспечивает принципиально новый уровень абстракции для анализа и оптимизации, фокусируясь на глобальной топологической структуре, а не на изолированных элементах.

Заключение

Представленная концепция репрезентации бизнес-процессов в виде многомерных топологических многообразий и применения адаптированных протоколов квантовых ходов и топологического квантового отжига для их оптимизации предлагает радикально новый теоретический взгляд на проблему повышения эффективности сложных систем, прежде всего в ИТ-сфере. Отход от линейных моделей в пользу многомерных топологических структур позволяет адекватно отразить присущую современным процессам нелинейность, взаимозависимость и динамическую сложность. Адаптация квантовых вычислительных парадигм, в частности квантовых ходов для исследования пространства состояний и квантового отжига для поиска глобального минимума, открывает теоретическую возможность преодоления вычислительных ограничений классических методов оптимизации. Введение метрики "топологической энтропии процесса" предоставляет количественную меру неэффективности, основанную на глобальной геометрии системы. Основным выводом является принципиальная возможность использования синтеза топологии и квантовых подходов для глобальной оптимизации, учитывающей целостную структуру взаимосвязей, что недостижимо в рамках традиционных локально ориентированных методов. Реализация предложенной концепции на практике потребует дальнейшей разработки строгого математического аппарата, методов дискретизации и параметризации топологических моделей процессов, а также исследований эффективности соответствующих квантовых алгоритмов на специализированных симуляторах или будущих квантовых процессорах. Несмотря на существующие технологические барьеры, данный подход

задает новое направление для фундаментальных и прикладных исследований на стыке теории управления, компьютерных наук, топологии и квантовой информатики.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. Dumas, M., La Rosa, M., Mendling, J., & Reijers, H. A. (2018). *Fundamentals of Business Process Management* (2nd ed.). Springer. 368c.
2. van der Aalst, W. M. P. (2013). Business Process Management: A Comprehensive Survey. *International Journal of Cooperative Information Systems*, 23(03), 1440001. DOI: 10.1142/S0218843014400012
3. Melao, N., & Pidd, M. (2000). A conceptual framework for understanding business processes and business process modelling. *Information Systems Journal*, 10(2), 105–129. DOI: 10.1046/j.1365-2575.2000.00075.x
4. Carlsson, G. (2009). Topology and data. *Bulletin of the American Mathematical Society*, 46(2), 255–308. DOI: 10.1090/S0273-0979-09-01249-X
5. Weske, M. (2019). *Business Process Management: Concepts, Languages, Architectures* (3rd ed.). Springer. 583 c.
6. Lee, J. M. (2013). *Introduction to Smooth Manifolds* (2nd ed.). Springer. 708 c.
7. Zomorodian, A. (2005). *Topology for Computing*. Cambridge University Press. 258 c.
8. Edelsbrunner, H., & Harer, J. (2010). *Computational Topology: An Introduction*. American Mathematical Society. 241 c.
9. Aharonov, D., Ambainis, A., Kempe, J., & Vazirani, U. (2001). Quantum walks on graphs. *Proceedings of the thirty-third annual ACM symposium on Theory of computing (STOC '01)*, 50–59. DOI: 10.1145/380752.380758
10. Papadimitriou, C. H., & Steiglitz, K. (1998). *Combinatorial Optimization: Algorithms and Complexity*. Dover Publications. 518 c.

11. Venegas-Andraca, S. E. (2012). Quantum walks: a comprehensive review. *Quantum Information Processing*, 11(5), 1015–1106. DOI: 10.1007/s11128-012-0432-5
12. Montanaro, A. (2016). Quantum algorithms: an overview. *npj Quantum Information*, 2, 15023. DOI: 10.1038/npjqi.2015.23
13. Farhi, E., Goldstone, J., Gutmann, S., & Sipser, M. (2000). Quantum Computation by Adiabatic Evolution. *arXiv preprint quant-ph/0001106*.
14. Portugal, R. (2018). *Quantum Walks and Search Algorithms* (2nd ed.). Springer. 326 c.
15. Kadowaki, T., & Nishimori, H. (1998). Quantum annealing in the transverse Ising model. *Physical Review E*, 58(5), 5355–5363. DOI: 10.1103/PhysRevE.58.5355
16. Das, A., & Chakrabarti, B. K. (2008). Colloquium: Quantum annealing and analog quantum computation. *Reviews of Modern Physics*, 80(3), 1061–1081. DOI: 10.1103/RevModPhys.80.1061
17. Albash, T., & Lidar, D. A. (2018). Adiabatic quantum computation. *Reviews of Modern Physics*, 90(1), 015002. DOI: 10.1103/RevModPhys.90.015002
18. Cover, T. M., & Thomas, J. A. (2006). *Elements of Information Theory* (2nd ed.). Wiley-Interscience. 776 c.
19. Morita, S., & Nishimori, H. (2008). Mathematical foundation of quantum annealing. *Journal of Mathematical Physics*, 49(12), 125210. DOI: 10.1063/1.2995837
20. Wasserman, L. (2018). Topological Data Analysis. *Annual Review of Statistics and Its Application*, 5, 501–532. DOI: 10.1146/annurev-statistics-031017-100045
21. Nielsen, M. A., & Chuang, I. L. (2010). *Quantum Computation and Quantum Information* (10th Anniversary ed.). Cambridge University Press. 708 c.

22. Mitchell, M. (2009). Complexity: A Guided Tour. Oxford University Press. 368 c.
23. Dimock, J. (2011). Quantum Mechanics and Quantum Field Theory: A Mathematical Primer. Cambridge University Press. 388 c.
24. Kendon, V. (2006). Decoherence in quantum walks – a review. Mathematical Structures in Computer Science, 17(6), 1169–1220. DOI: 10.1017/S0960129507006354
25. Lucas, A. (2014). Ising formulations of many NP problems. Frontiers in Physics, 2, 5. DOI: 10.3389/fphy.2014.00005
26. Jaynes, E. T. (1957). Information Theory and Statistical Mechanics. Physical Review, 106(4), 620–630. DOI: 10.1103/PhysRev.106.620
27. Apolloni, B., Carvalho, C., & de Falco, D. (1989). Quantum stochastic optimization. Stochastic Processes and their Applications, 33(2), 233–244. DOI: 10.1016/0304-4149(89)90040-9
28. van der Aalst, W. M. P. (2016). Process Mining: Data Science in Action (2nd ed.). Springer. 467 c.