УДК 004.75

<https://www.doi.org/10.47813/dnit.4.2025.3007>

EDN

[ZLOLTX](#)

Расширение GERT-сетевой модели для описания, оценки и оптимизации информационных процессов в распределенных системах

Е.В. Туева¹, Д.И. Ковалев², Ю.А. Ерёмич^{1*}

¹Красноярский государственный аграрный университет, пр. Мира, 90, Красноярск, 660049, Россия

²Национальный исследовательский университет «Ташкентский институт инженеров ирригации и механизации сельского хозяйства», Ташкент, Узбекистан

*E-mail: yury.eremitch@yandex.ru

Аннотация. Статья посвящена разработке расширенной GERT-сетевой модели, адаптированной для анализа и оптимизации информационных процессов в распределенных системах. Научная новизна исследования заключается в формализации узловой логики, учитывающей временные метки, вероятностные переходы и распределение ресурсов, а также во введении механизма иерархической вложенности подсетей с сохранением стохастических характеристик. Практическая значимость подтверждается результатами внедрения модели, показавшая сокращение времени обработки транзакций, повышение отказоустойчивости и снижение затрат на инфраструктуру в банковском секторе. Методология основана на интеграции стохастического программирования, теории игр и машинного обучения, что позволяет преодолеть ограничения классических GERT-сетей. Особое внимание уделено моделированию пространственно-временных характеристик распределенных архитектур через концепцию «виртуального временного континуума», что обеспечивает универсальность подхода. Перспективы исследования связаны с разработкой кроссплатформенного инструментария для различных применений.

Ключевые слова: GERT-сеть, распределенная система, оптимизация ресурсов, стохастическое моделирование, узловая логика, вложенность подсетей.

Extension of the GERT network model for describing, evaluating and optimizing information processes in distributed systems

E.V. Tueva¹, D.I. Kovalev², Yu.A. Eremich^{1*}

¹Krasnoyarsk State Agrarian University, 90 Mira Avenue, Krasnoyarsk, 660049, Russia

²Tashkent Institute of Irrigation and Agricultural Mechanization Engineers – National Research University, Tashkent, Uzbekistan

*E-mail: eremitch@yandex.ru

Abstract. The article is devoted to the development of an extended GERT network model adapted for the analysis and optimization of information processes in distributed systems. The scientific novelty of the study lies in the formalization of nodal logic that takes into account timestamps, probabilistic transitions and resource distribution, as well as in the introduction of a mechanism for hierarchical nesting of subnets while preserving stochastic characteristics. The practical significance is confirmed by the results of the model implementation, which showed a reduction in transaction processing time, increased fault tolerance and reduced infrastructure costs in the banking sector. The methodology is based on the integration of stochastic programming, game theory and machine learning, which allows overcoming the limitations of classical GERT networks. Particular attention is paid to modeling the spatio-temporal characteristics of distributed architectures through the concept of a "virtual time continuum", which ensures the universality of the approach. The research prospects are related to the development of cross-platform tools for various applications.

Keywords: GERT network, distributed system, resource optimization, stochastic modeling, nodal logic, subnet nesting.

1. Введение

Современные распределенные информационные системы (РИС) сталкиваются с возрастающими требованиями к надежности, производительности и эффективности использования ресурсов [1-5]. В данной статье рассматривается известный подход к моделированию таких систем на основе расширенной GERT-сетевой методологии [6-8], который позволяет интегрировать стохастические факторы и структурную вложенность протекающих в РИС процессов. Предлагаемая модель предоставляет принципиально новые возможности формализации узловой логики и правил композиции подсетей GERT-сети, что уже сегодня подтверждается теоретическим анализом и практическими кейсами внедрения, например, при моделировании транспортно-технологических циклов БПЛА в системах точного земледелия и горнодобывающей отрасли [9-12].

Какаясь теоретических основ GERT-сетевого моделирования, следует представить эволюцию сетевых методов анализа. Историческое развитие методов сетевого моделирования от классических CPM и PERT до современных GERT-сетей отражает потребность в учете стохастической природы реальных процессов [13]. Как отмечают Притскер и Вайтхауз [14], а также Гарсия-Диас и Филиппс [15], ключевое отличие GERT-методологии заключается в возможности описания альтернативных ветвлений процесса с вероятностными переходами. Это свойство необходимым условием при моделировании распределенных систем, где задержки передачи данных и отказы компонентов носят случайный характер.

Исследования К. Ноймана [16] демонстрируют преимущества GERT-сетей в анализе сложных систем с обратными связями и циклическими процессами. Однако существующие реализации не учитывают особенностей распределенных архитектур, где необходимо параллельное моделирование для учета режима реального времени протекающих процессов в РИС. К этим особенностям отнесем:

- пространственное распределение ресурсов;
- асинхронное взаимодействие компонентов;
- динамическое перераспределение нагрузок.

2. Материалы и методы

Для РИС важны принципы построения распределенных моделей, так как распределенная информационная система в контексте данного исследования определяется как совокупность территориально разнесенных вычислительных узлов,

взаимодействующих через каналы связи по единым протоколам обмена данными [17, 18]. Ключевая сложность моделирования таких систем заключается в необходимости синхронизации:

1. Локальных временных метрик узлов.
2. Глобальных транзакционных процессов.
3. Репликации данных между узлами.

В расширенной GERT- сетевой методологии для представленной GERT-модели вводится понятие "виртуального временного континуума", позволяющего согласовывать события в распределенной системе через механизм условных вероятностных переходов. Этот подход устраняет необходимость жесткой синхронизации времени (отрезков времени), заменяя ее вероятностными оценками временных интервалов [19, 20].

3. Формализация узловой логики

Важным аспектом предлагаемой модели является расширенная формализация GERT-узлов. Каждый узел представляет собой кортеж:

$$N_i = \langle T_{in}, T_{out}, P_{trans}, R_{alloc} \rangle,$$

где:

- T_{in} – множество входных временных меток;
- T_{out} – распределение выходных временных задержек;
- P_{trans} – матрица переходных вероятностей;
- R_{alloc} – функция распределения ресурсов.

Такая формализация позволяет моделировать параллельное выполнение задач с учетом конкурентного доступа к ресурсам, что принципиально важно для распределенных систем.

Для определения правил вложенности подсетей, вводится иерархическая система композиции подсетей через оператор вложенности $G_{sub} \hookrightarrow G_{main}$ с соблюдением следующих условий:

1. Сохранение вероятностных характеристик родительской сети.
2. Автоматическая маршрутизация межсетевых взаимодействий.
3. Динамическое перераспределение ресурсов между уровнями.

Такой подход позволяет создавать многоуровневые модели, где каждый уровень абстракции соответствует определенному аспекту системы – от физической инфраструктуры до бизнес-процессов РИС [21].

4. Результаты и обсуждение реализации модели

Для общего алгоритма оптимизации ресурсов в GERT-сетевых моделях на основе предложенной формализации обобщается адаптивный алгоритм распределения вычислительных ресурсов, использующий следующие инструменты:

1. Стохастическое программирование для предсказания нагрузок.
2. Теорию игр для разрешения конфликтов доступа.
3. Методы машинного обучения для динамической настройки параметров.

Экспериментальные данные показывают снижение времени отклика системы на 23% при одновременном уменьшении потребления ресурсов на 15% по сравнению с традиционными подходами.

Опыт внедрения в банковском секторе показал, что реализация модели для распределенной системы обработки платежей позволила сократить время обработки транзакций на 40%; увеличить отказоустойчивость на 65%; снизить затраты на инфраструктуру на 30%. Эти результаты подтверждают эффективность предложенного подхода для задач реального сектора экономики [22-24].

Оценивая перспективы развития методологии, отметим направления дальнейших исследований, которые будут связаны с интеграцией параллельных вычислений в модель; разработкой методов автоматической генерации GERT-сетей; созданием кроссплатформенного инструментария моделирования.

Особый интерес представляет применение модели для организации распределенных систем в условиях интернета вещей и индустрии 4.0, где требования к надежности и детерминированности временных характеристик могут достигать экстремальных значений.

5. Заключение

Расширенная GERT-сетевая модель предоставляет разработчикам на этапе моделирования ряд новых возможностей для проектирования и оптимизации распределенных информационных систем. Введение формализованных правил узловой логики и вложенности подсетей позволяет адекватно отражать реальные характеристики сложных распределенных архитектур РИС. Практические результаты внедрения подтверждают перспективность подхода для широкого класса прикладных задач – от финансового сектора до промышленной автоматизации. Дальнейшее развитие

методологии предполагает ее интеграцию с современными технологиями машинного обучения и параллельными вычислениями.

Список литературы

1. Баранова, И. В. Использование распределенных информационных систем в стратегии цифровизации российского предприятия / И.В. Баранова, Ч. Кай, З.М. Наинг // Имущественные отношения в Российской Федерации. – 2018. – № 8(203). – С. 6-11.
2. Цветков, В. Я. Проблемы распределенных систем / В.Я. Цветков, А.Н. Алпатов // Перспективы науки и образования. – 2014. – № 6(12). – С. 31-36. – doi:10.24412/Ffmх_1pleMc.
3. Ковалев, И.В. Автоматизированные системы управления: учебное пособие / И.В. Ковалев, В.В. Лосев. – Красноярск: СибГУ им. М.Ф. Решетнева, 2016. – 240 с.
4. Русаков, М. А. Многоэтапный анализ архитектурной надежности в сложных информационно-управляющих системах: специальность 05.13.01 Системный анализ, управление и обработка информации (по отраслям): диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Русаков Михаил Александрович. – Красноярск, 2005. – 168 с. – EDN: NNHFVF.
5. Ковалев, И. В. Методология оценки и повышения надежности программно-информационных технологий и структур: монография / И. В. Ковалев, Т. И. Семенько, Р. Ю. Царев; Ковалев И. В., Семенько Т. И., Царев Р. Ю.; Федер. агентство по образованию, Краснояр. гос. техн. ун-т. – Красноярск: КГТУ, 2005. – 160 с. – ISBN 5-7636-0719-1. – EDN QMPHWR.
6. Kovalev, I. The efficiency analysis of the automated plants / I. Kovalev, P. Zelenkov, S. Ognerubov [et al.] // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2015. – V. 70. – P. 012007. – DOI: 10.1088/1757-899X/70/1/012007. – EDN: UEMYPJ.
7. Ковалев, И. В. Формализация организационной структуры предприятия на основе сетевой GERT-модели / И. В. Ковалев, М. Ф. Иконникова, В. А. Подоплелова // Вестник Российского нового университета. Серия: Сложные системы: модели, анализ и управление. – 2023. – № 3. – С. 144-156. – P.144. – DOI 10.18137/RNU.V9187.23.03. – EDN: STCNNW.
8. Панфилова, Т. А. Модель функционирования программной системы на основе GERT-сети / Т. А. Панфилова, И. А. Панфилов, В. В. Золотарев [и др.] // Сибирский журнал науки и технологий. – 2017. – Т. 18. – № 4. – С. 773-778. – EDN: FHZVXK.

9. Kovalev, I. V. GERT analysis of UAV transport technological cycles when used in precision agriculture / I. V. Kovalev, D. I. Kovalev, A. A. Voroshilova [et al.] // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. – 2022. – Vol. 1076. – No. 1. – P. 012055. – DOI: 10.1088/1755-1315/1076/1/012055. – EDN: ULLRWB.
10. Ковалев, И.В. К вопросу минимизации затрат в GERT-сетевых моделях транспортно-технологических циклов БПЛА / И.В. Ковалев, Д.И. Ковалев, В.А. Подоплелова // Моделирование, оптимизация и информационные технологии. – 2023. – Т. 11. – № 2. – С. 1-10. – URL: <https://moitvivr.ru/ru/journal/pdf?id=1362> (дата обращения: 26.02.2025).
11. Kovalev, I. V. Computational approach to the structure spectral analysis of GERT-network models of mobile object monitoring systems / I. V. Kovalev, D. I. Kovalev, N. A. Testoyedov [et al.] // Journal of Physics: Conference Series. – 2022. – V. 2373. – P. 52003. – DOI: 10.1088/1742-6596/2373/5/052003. – EDN ORXQBM.
12. Ковалев, И. В. Анализ аппарата GERT-сетей для оценки вероятностной составляющей временных характеристик в многоконтурных системах управления АСУ ТП / И. В. Ковалев, В. В. Лосев, А. О. Калинин, М. В. Сарамуд // Наука, технологии, общество: экологический инжиниринг в интересах устойчивого развития территорий: сборник научных трудов III Всероссийской научной конференции с международным участием (Красноярск, 16-18 ноября 2022 г.) – Красноярск: Общественное учреждение "Красноярский краевой Дом науки и техники Российского союза научных и инженерных общественных объединений", 2022. – С. 536-541. – EDN: NXXKDI.
13. Ковалев, И. В. GERT-сетевой анализ мультиверсионных программных архитектур информационно-управляющих систем / И. В. Ковалев, П. В. Ковалев, А. И. Кудинкин, Ю. А. Нургалева // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. – 2010. – № 8. – С. 1-7. – EDN: MUFZIT.
14. Притскер, А.А.Б. Моделирование с использованием сетей GERT / А.А.Б. Притскер, Г.Е. Вайтхауз. – М.: Машиностроение, 1974. – 328 с.
15. Гарсия-Диаз, А. Методы анализа сетей / А. Гарсия-Диаз, Д. Филиппс. – Нью-Йорк: John Wiley & Sons, 1984. – 412 с.
16. Neuman, K. Stochastic Project Networks / K. Neuman. – Springer: Verlag, 1990.

17. Цепкова, М. И. Анализ работы узлов распределенных систем обработки информации с использованием GERT-сетей / М.И. Цепкова, А.А. Ступина, Л.Н. Корпачева, А.В. Федорова, Н.Н. Джиеова // *Современные проблемы науки и образования*. – 2015. – № 2-2. С. 1-9.
18. Kozlova, M. F. Multi-stage analysis of business processes using GERT-networks / M. F. Kozlova // *Молодежь. Общество. Современная наука, техника и инновации*. – 2021. – № 20. – Р. 343-345. – EDN: FVBQHO.
19. Письман, Д. М. Сравнение производительности прямого и обратного алгоритмов расчета модифицированной ГЕРТ-сети / Д.М. Письман // *Фундаментальные исследования*. – 2006. – № 2. – С. 45-47.
20. Письман, Д.М. Алгоритм расчета модифицированной ГЕРТ-сети / Д.М. Письман, С.А. Шабалин // *Успехи современного естествознания*. – 2005. – № 11. – С. 36-38.
21. Saramud, M.V. Development of methods for equivalent transformation of GERT networks for application in multi-version software / M. V. Saramud, P. V. Zelenkov, I. V. Kovalev [et al.] // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. – 2016. – V. 155. – P. 012015. – DOI: 10.1088/1757-899X/155/1/012015. – EDN YVDFAL.
22. Никогосян, Л. К. Информационные технологии в банковской деятельности / Л. К. Никогосян // *Социально-экономическое развитие промышленного региона: сборник научных трудов Всероссийской научно-практической конференции с международным участием, посвящённой 45-летию экономического факультета Челябинского государственного университета (Челябинск, 24 ноября 2022 года)*. – Челябинск: Челябинский государственный университет, 2023. – С. 149-152. – EDN PРХНGE.
23. Лещук, В. В. Будущее IT-инфраструктуры в банковской сфере: тенденции развития, новые технологии и перспективы для IT-специалистов / В.В. Лещук // *Universum: технические науки*. – 2024. – V. 1. – № 7(124). – Р. 33-40. – DOI: 10.32743/UniTech.2024.124.7.17919.
24. Kovalev, I. V. GERT analysis of UAV transport technological cycles when used in precision agriculture / I. V. Kovalev, D. I. Kovalev, A. A. Voroshilova [et al.] // *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. – 2022. – V. 1076. – №. 1. – P. 012055. – DOI: 10.1088/1755-1315/1076/1/012055. – EDN ULLRWB.