

# Моделирование сетей связи высокой размерности

Ю. Ю. Терентьева

**Аннотация**— Представлены результаты разработки инструмента моделирования территориально распределенных сетей связи высоких размерностей, который неоднократно использовался при выполнении работ, связанных с проектированием, модернизацией и эксплуатацией сетей связи высоких размерностей. Сделан акцент на теоретико-алгоритмических моментах, а также на особенности и функциональные возможности самого программного обеспечения. Актуальность разработки особенно высока в условиях стремительно развивающейся сетевой архитектуры, включающей многопараметрические объекты, строительство/модернизация/эксплуатация которых сопровождается значительными затратами ввиду масштабности современных сетей связи. То есть совокупность проведенных программно-реализованных теоретических исследований в области анализа сетей связи являет собой качественный инструмент для выполнения технико-аналитических работ, предваряющих строительство новых объектов сети связи (с выработкой оптимального решения, что чрезвычайно важно и имеет экономический эффект при территориально разнесенных сетях), организации новых каналов связи, а также может рассматриваться в качестве основы инструмента мониторинга состояния сети связи и генерации оптимальных решений задач обработки ее параметров.

**Ключевые слова:** цифровой двойник сети связи, сеть связи, теория графов.

## I. ВВЕДЕНИЕ

Следуя известной поговорке «семь раз отмерь – один раз отрежь» заметим, что это как нельзя актуально при разработке современных сетей связи, имеющих высокую размерность. Актуальность подтверждается также высокими экономическими и техническими рисками неоптимальных решений. Практика разработок сетей связи [1-3] свидетельствует о том, что программный аналог сети связи, способный моделировать внутренние процессы, процессы проектирования и/или модернизации, эксплуатации сети, производить оценку технических характеристик и параметров функционирования сети, в том числе в условиях воздействий помех и окружающей среды, является обязательным атрибутом инженерно-технического сопровождения их жизненного цикла.

В современном мире объективные тренды развития технологического обеспечения процессов разработки сложных ресурсоемких объектов и систем, включающих этапы проектирования, испытания, производства и эксплуатации, диктуют необходимость поиска цифровых технологий, позволяющих максимально приблизить эти процессы к действиям с

виртуальным аналогом физического объекта. Сеть связи является, несомненно, одной из сложных ресурсоемких систем.

Историческая справка. В 2011 г. Сектором стандартизации электросвязи Международного союза электросвязи (Швейцария, Женева) приняты рекомендации серии Y.3000 о концепции будущих сетей FN (FutureNetwork). В основу этой концепции положены методы и средства распределённого искусственного интеллекта, технология виртуализации, когнитивные модели сетей (в целях понимания и предсказания), принципы многоагентной самоорганизации с функциями самоконфигурации, оптимизации и восстановления.

Отметим также, что тенденции государственной политики импортозамещения диктуют условия необходимости разработки отечественных программных аналогов. Наиболее близким по функциональной направленности можно считать ГИС «Панорама», которая, однако, требует немало дополнительных модулей для решения задач проектирования и/или модернизации сети связи.

Представленный далее материал посвящен описанию программного продукта, осуществляющего моделирование сети связи в различных его аспектах. Проблематика задач моделирования продиктована реальными задачами реальных операторов связи. Результаты исследования и разработки программного продукта неоднократно использовались при анализе и проектировании сетей связи.

## II. ФУНКЦИОНАЛ ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ СЕТИ СВЯЗИ

Назначение программного обеспечения реализуется посредством совокупности трех взаимосвязанных функциональных компонент. Это визуализация, управление данными и анализ. Синтез этих функциональных компонент позволяет решать как задачи тестирования разрабатываемых алгоритмов, так и задачи, непосредственно связанные с анализом и обработкой параметров широкомасштабных сетей связи.

Отдельно отметим возможность тестирования разрабатываемых алгоритмов на графах. В совокупности с этой возможностью разработанная среда моделирования сетей связи является качественным

инструментом для решения широкого спектра задач анализа сетей связи.

Кроме того, разработан блок алгоритмов, решающих оптимизационные задачи на графах, касающиеся в основном минимизации весов вновь образуемых ребер. Под весом ребра в данном случае понимается географическое расстояние между вершинами графа сети связи, отождествляемыми с точками на поверхности Земли. Эта оптимизация особенно важна в условиях сетей связи высокой размерности, поскольку суммарное значение весов имеет положительную корреляцию со стоимостью прокладки новых линий связи, что в свою очередь является значимым экономическим фактором при проектировании и/или модернизации сетей связи.

### III. ОСНОВНЫЕ ФУНКЦИИ ВИЗУАЛИЗАЦИИ

- 1) Представление масштабируемой карты (до 17 уровня включительно; уровень детализации – до номеров домов). При этом имеется возможность работы с различными поставщиками карт, такими как ГИС Панорама, Яндекс-карты и др., а также с локальным, автономным, собственным сервером, содержащим картографическую информацию.

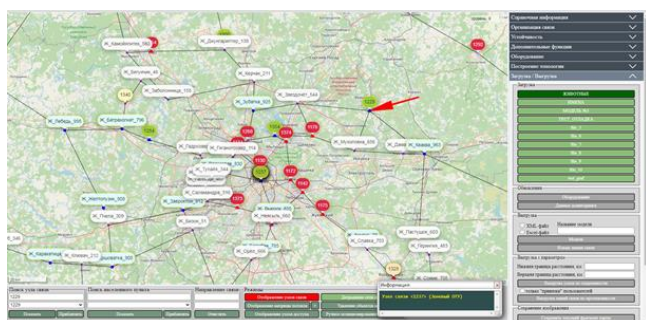


Рис. 1. Представление сети связи на масштабируемой карте

- 2) Представление топологии сети связи на картографической основе.
- 3) Представление информации об узлах и линиях связи в различных режимах: в режиме наведения – экспресс-информация, в режиме клика – отображение атрибутов объекта связи.
- 4) Поиск и отображение узлов связи, а также населенных пунктов РФ на картографической основе (см. рис. 1) в текущем масштабе и с приближением.
- 5) Представление маршрутов на карте, а также в информационном окне составляющих их компонентов (предусмотрено изменение цвета маршрута).

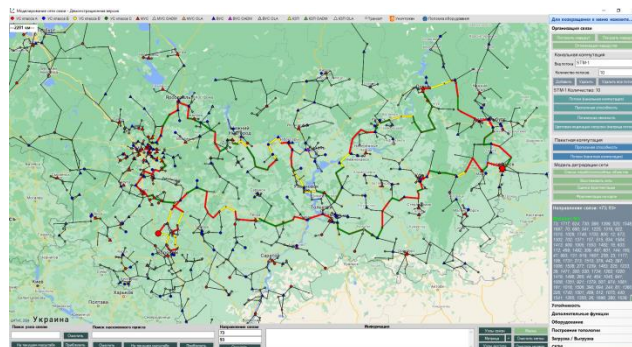


Рис. 2. Цветовая индикация загруженности участков каналов связи

- 6) Отображение матрицы потоков с изменением цветовой палитры.
- 7) Отображение канальной коммутации в виде цветовой индикации загруженности каналов связи в зависимости от заявленного потока направления связи и пропускной способности оборудования (см. рис. 2).
- 8) Отображение пакетной коммутации в виде цветовой индикации загруженности каналов связи в зависимости от заявленного потока направления связи и пропускной способности оборудования.
- 9) Отображение подсетей при функциональной фрагментации сети (см. рис. 3).

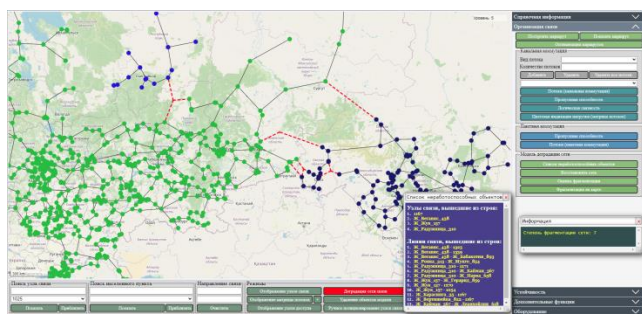


Рис. 3. Отображение фрагментации сети связи

- 10) Отображение зон контроля центров управления.

### IV. ОСНОВНЫЕ ФУНКЦИИ УПРАВЛЕНИЯ ДАННЫМИ

Информация, которая обрабатывается в программе, может быть в двух вариантах: как XML-файлы, так и непосредственно взяты из СУБД. В качестве СУБД рассматривалась PostgreSQL.

Здесь следует отметить, что в качестве промежуточного этапа разработки исходные данные в требуемом формате не являлись результатом интерфейсного ввода (это планируется сделать в дальнейшем), а загружались специальным образом.

Далее перечислим основные реализованные функции управления данными:

- 1) Загрузка моделей различных сетей связи, включая топологию, информацию об узлах и линиях связи, оборудовании на узлах связи, матрицы потоков и т.д. Эта функция позволяет оценить взаимное

расположение различных подсетей и являет собой приближение к единому информационному пространству рассматриваемых сетей связи.

- 2) Загрузка наименования населенных пунктов Российской Федерации с указанием численности населения.
- 3) Определение статуса объекта связи (узла связи и/или линии связи) как вышедшего из строя
- 4) Генерация структуры и состава узлов связи заданного типа с параметрами, учитывающими численность населенных пунктов РФ, либо с равномерным распределением. Это позволяет формировать графы сетей связи (с учетом геополитической инфраструктуры) для верификации разработанных алгоритмов.
- 5) Задание/изменение комплектации оборудования на узле связи с учетом видов портов.
- 6) Назначение потоков на направлении связи с выбором различных типов.
- 7) Автоматизированное рандомное задание комплектации оборудования на узлах связи для пакетной коммутации, а также для канальной коммутации
- 8) Выгрузка информации: топология сети, информация о построенных линиях связи, информация о загрузке узлов связи, включая линейный и станционный сегмент, картографическое изображение сети связи заданного масштаба и т.п.

#### V. АНАЛИТИЧЕСКИЕ ФУНКЦИИ

- 1) Построение оптимального остовного дерева топологии сети для узлов сети связи.
- 2) Построение оптимальных привязок узлов связи потребителей к узлам доступа.
- 3) Оптимальное восстановление связности сети связи при фрагментации [4] – см. рис.4.

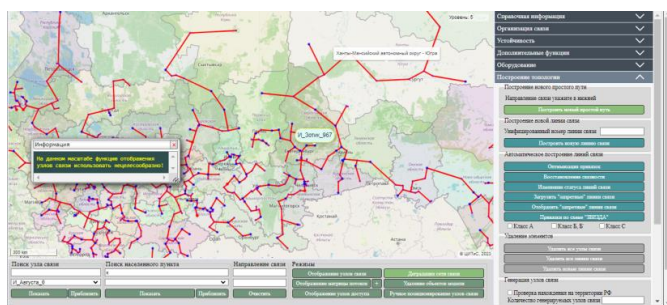


Рис. 4. Построение искусственных сетей связи для тестирования алгоритмического блока, а также для оптимизации «привязок» пользователей

- 4) Расчет нагрузки на узлы связи с учетом станционного и линейного сегмента, а также с учетом возможной оптимизации передачи по линейному сегменту.
- 5) Определение оценки надежности и живучести направления связи и сети связи [5]

- 6) Нахождение независимых маршрутов направления связи (в том числе перестраивание маршрутов с учетом вышедших из строя объектов сети связи) [6]; оптимизация количества и поиск максимального количества вершинно-независимых маршрутов направления связи [6-8] – см. рис. 5

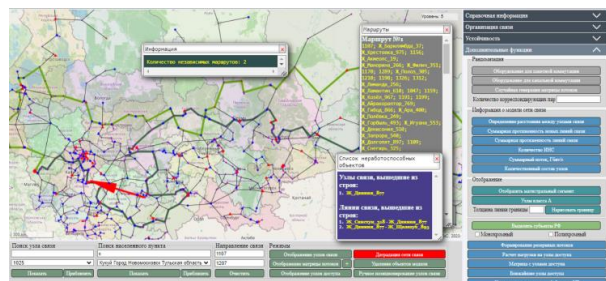


Рис. 5. Построение географически разнесенных маршрутов

- 7) Определение пропускной способности направления связи при канальной и пакетной коммутации (в том числе с учетом вышедших из строя объектов сети связи) [8] с предоставлением информации о маршрутах.

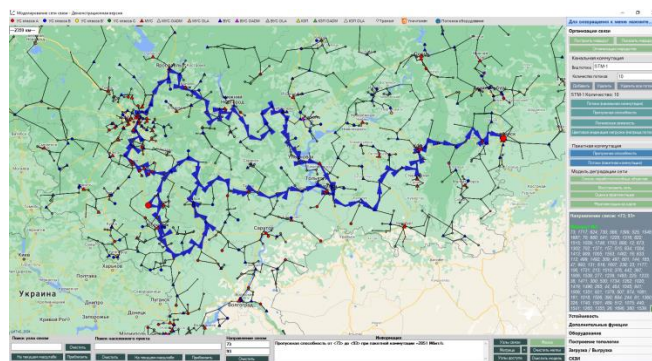


Рис. 6. Определение пропускной способности направления связи при пакетной коммутации

- 8) Определение перечня узлов связи, требующих дооснащения для пропуска заявленного трафика установленного направления связи, для канальной коммутации
- 9) Построение оптимального резервного пути для заданного направления связи путем определения новых линий связи
- 10) Расчет надежности системы управления согласно модели, включающей информацию о топологии сети связи, о схеме резервирования, о надежности центров управления (расчет производится согласно комплектации оборудования и их показателей работоспособности на отказ), с учетом (расчетом) надежности сети связи.
- 11) Реализация сценария деградации сети связи посредством вывода из строя узлов и линий связи с последующей оценкой ситуации посредством вышеизложенного функционала.

Заметим здесь, что п.4, изложенный выше, имеет огромное значение в вопросах организации каналов связи,

в вопросах резервирования, в вопросах обеспечения живучести сети связи. Автором разработан эффективный алгоритм [8], позволяющий решать качественно задачу поиска резервных путей, которая, как правило, решалась неоптимально, что для сетей связи высоких размерностей являлось критическим фактором.

## VI. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Совокупность решаемых задач программным обеспечением, моделирующим различные аспекты жизненного цикла сети связи, отражает современную мировую тенденцию развития технологий электросвязи, и является инструментарием обеспечения качества сети связи, может быть использован для осуществления контроля качества предоставляемых услуг связи сети связи, а также выработки оптимальных решений, направленных на достижение заданных показателей качества функционирования сети связи. В работе представлено описание программного обеспечения, так называемого прототипа цифрового двойника сети связи, с изложением его (прототипа) функциональных возможностей, являющихся в свою очередь важной ступенью к непосредственно самому цифровому двойнику сети связи.

В качестве планируемых задач к реализации в рамках развития данной среды моделирования сетей связи (в том числе высоких размерностей) рассматривается крайне актуальная задача автоматизация цифровой системы передачи информации по сети связи с учетом паспортов каналов связи, состава оборудования, а также оптимальной упаковки в линейном сегменте трассы.

## БИБЛИОГРАФИЯ

- [1] Saracco, R. Digital twins: Bridging physical space and cyberspace // *Computer*. – 2019. – Vol. 52, no. 12. – P. 58–64. doi: <https://doi.org/10.1109/MC.2019.2942803>
- [2] Madni, A.M., Madni, C.C., Lucero, S.D. Leveraging digital twin technology in model-based systems engineering // *Systems*. – 2019. – Vol. 7, issue 1. – P. 7. doi: <https://doi.org/10.3390/systems7010007>
- [3] Barricelli, B.R., Casiraghi, E., Fogli, D. A survey on digital twin: Definitions, characteristics, applications, and design implications // *IEEE Access*. – 2019. – Vol. 7. – P. 167653-167671. doi: <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2953499>
- [4] Терентьева, Ю.Ю. Некоторые теоретические вопросы практических алгоритмов дефрагментации сети связи // *International Journal of Open Information Technologies*. – 2021. – Т. 9, № 3. – С. 23-27. EDN: KRVLTR
- [5] Терентьева, Ю.Ю. Метод получения оценки надежности крупномасштабной сети связи с учетом зависимых путей // *Информатизация и связь*. – 2017. – № 1. – С. 122-128. EDN: YMHEPR

- [6] Мельников, Б.Ф., Стариков, П.П., Терентьева, Ю.Ю. Об одной задаче анализа топологии коммуникационных сетей // *International Journal of Open Information Technologies*. – 2022. – Т. 10, № 6. – С. 1-8. EDN: HKLQYD
- [7] Терентьева, Ю.Ю. Определение максимального множества независимых простых путей между вершинами графа // *Современные информационные технологии и ИТ-образование*. – 2021. – Т. 17, № 2. – С. 308-314. doi: <https://doi.org/10.25559/SITITO.17.202102.308-314>
- [8] Кормен, Т. и др. Алгоритмы: построение и анализ. – 2-е изд. – М.: Вильямс, 2006. – С. 1296.
- [9] Терентьева, Ю.Ю. Максимальное множество вершинно-независимых путей // *International Journal of Open Information Technologies*. 2023. Т. 11, № 11. С. 58-63. EDN: TYDQUL

Статья получена 27 ноября 2023.

Ю.Ю. Терентьева – начальник управления анализа и методологии совершенствования информационных телекоммуникационных систем, кандидат технических наук, Центр информационных технологий и систем органов исполнительной власти им. А.В. Старовойтова, Москва, Россия (e-mail: [terjul@mail.ru](mailto:terjul@mail.ru)), <https://orcid.org/0000-0002-2418-003X>



# Modeling of high-dimensional communication networks

Yulia Y. Terentyeva

**Abstract**— The results of the development of a tool for modeling geographically distributed high-dimensional communication networks, which has been repeatedly used in the performance of work related to the design, modernization and operation of high-dimensional communication networks, are presented. The emphasis is placed on the theoretical and algorithmic aspects, as well as on the features and functionality of the software itself. The relevance of the development is especially high in the conditions of a rapidly developing network architecture, including multiparametric facilities, the construction / modernization / operation of which is accompanied by significant costs due to the scale of modern communication networks. That is, a set of software-implemented theoretical studies in the field of communication network analysis is a qualitative tool for performing technical and analytical work that precedes the construction of new communication network facilities (with the development of an optimal solution, which is extremely important and has an economic effect with geographically dispersed networks), the organization of new communication channels, and can also be considered as fundamentals of a tool for monitoring the state of a communication network and generating optimal solutions to problems of processing its parameters.

**Keywords**—digital twin of a communication network, communication network, graph theory

## REFERENCES

- [1] R. Saracco, Digital twins: Bridging physical space and cyberspace. *Computer*, vol. 52, no. 12, p. 58-64, 2019. doi: <https://doi.org/10.1109/MC.2019.2942803>
- [2] A. M. Madni, C. C. Madni, S. D. Lucero, Leveraging digital twin technology in model-based systems engineering. *Systems*, vol. 7, issue 1, p. 7, 2019. doi: <https://doi.org/10.3390/systems7010007>
- [3] B. R. Barricelli, E. Casiraghi, D. Fogli, A survey on digital twin: Definitions, characteristics, applications, and design implications. *IEEE Access*, vol. 7, p. 167653-167671, 2019. doi: <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2953499>
- [4] Yu. Yu. Terentyeva, Some theoretical issues related to the description of practical algorithms for constructing spanning trees. *International Journal of Open Information Technologies*, vol. 9, no. 3, p. 23-27, 2021. (In Russ., abstract in Eng.) EDN: KRVLTR
- [5] Yu. Yu. Terentyeva, Method of calculating of large-scale networks reliability estimation allowing for dependent routes. *Informatization and communication*, no. 1, p. 122-128, 2017. (In Russ., abstract in Eng.) EDN: YMHEPR
- [6] B. F. Melnikov, P. P. Starikov, Yu. Yu. Terentyeva, On one task of analyzing the topology of communication networks. *International Journal of Open Information Technologies*, vol. 10, no. 6, p. 1-8, 2022. (In Russ., abstract in Eng.) EDN: YMHEPR
- [7] Yu. Yu. Terentyeva, Determination of the Maximum Set Independent Simple Paths between the Vertices of the Graph. *Modern Information Technologies and IT-Education*, vol. 17, no. 2, p. 308-314, 2021. (In Russ., abstract in Eng.) doi: <https://doi.org/10.25559/SITI-TO.17.202102.308-314>
- [8] T. Cormen, et al. Algorithms: construction and analysis. 2nd ed. Moscow: Williams; 2006. p. 1296.
- [9] Yu. Yu. Terentyeva, Maximum set shortest vertex-independent paths. *International Journal of Open Information Technologies*, vol. 11, no. 11, p. 58-63, 2023. (In Russ., abstract in Eng.) EDN: TYDQUL

## About the author:

**Yulia Yu. Terentyeva**, Head of the Department of Analysis and Methodology for Improving Information and Telecommunications Systems, Center for Information Technologies and Systems of Executive Authorities (19 Presnensky Val St., building 1, Moscow 123557, Russian Federation), Cand. Sci. (Eng.), [terjul@mail.ru](mailto:terjul@mail.ru), <http://orcid.org/0000-0002-2418-003X>