

УДК 654.1

<https://doi.org/10.31854/2307-1303-2026-14-3-1-10>

EDN: SVCCLM

Анализ возможности применения цифровых двойников в управлении современными телекоммуникационными сетями

Елагин В. С.¹, Андриевский Н. К.² ✉

¹ Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича,
Санкт-Петербург, 193232, Российская Федерация

² Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,
Санкт-Петербург, 195251, Российская Федерация

Постановка задачи. Рост объемов передаваемого трафика и усложнение телекоммуникационных сетей обуславливают переход к современным подходам управления, ориентированным на повышение автономности и снижение степени участия человека. Традиционные инструменты управления характеризуются рядом ограничений, что снижает их применимость в рамках новых подходов. В качестве одного из перспективных инструментов реализации современных концепций управления рассматриваются цифровые двойники. **Целью** работы является анализ возможностей применения цифровых двойников в современных подходах к управлению телекоммуникационными сетями. **Используемые методы:** в основе работы лежит анализ международных стандартов и рекомендаций, а также обобщение результатов современных научных исследований в области цифровых двойников телекоммуникационных сетей. **Основные результаты:** обобщена архитектура цифрового двойника сети и его ключевые компоненты; показано, что его применение обеспечивает формирование целостного виртуального представления сети, поддержку предиктивного анализа, реализацию замкнутых циклов автоматизации, а также безопасное тестирование конфигурационных изменений. **Теоретическая значимость:** обоснована роль цифрового двойника сети как инструмента реализации современных подходов к управлению телекоммуникационными сетями, а также систематизированы ключевые компоненты и архитектурные принципы построения цифрового двойника сети.

Ключевые слова: цифровой двойник сети, инструменты управления, конфигурационные изменения, замкнутые циклы автоматизации, предиктивный анализ, моделирование сети, архитектура цифрового двойника

Введение

Современные телекоммуникационные сети характеризуются систематическим ростом объемов передаваемого трафика, обусловленным увеличением числа абонентов, подключенных устройств, развитием новых цифровых сервисов, умных производств, облачных вычислений и сетей нового поколения

Библиографическая ссылка на статью:

Елагин В. С., Андриевский Н. К. Анализ возможности применения цифровых двойников в управлении современными телекоммуникационными сетями // Информационные технологии и телекоммуникации. 2026. Т. 14. № 3. С. 1–10. DOI: 10.31854/2307-1303-2026-14-3-1-10. EDN: SVCCLM

Reference for citation:

Elagin V., Andrievskiy N. Analysis of the Applicability of Digital Twins in the Management of Modern Telecommunication Networks // Telecom IT. 2026. Vol. 14. Iss. 3. PP. 1–11. (in Russian). DOI: 10.31854/2307-1303-2026-14-3-1-10. EDN: SVCCLM

(5G / 6G). По данным Министерства цифрового развития, связи и массовых коммуникаций Российской Федерации, в 2024 г. общий объем трафика в фиксированных и мобильных сетях вырос на 24,4 % по сравнению с 2023 г. – с 151 521 до 188 530 петабайт (ПБ). При этом трафик фиксированного интернета увеличился на 28,1 %, а мобильного – на 13,9 %. Количество активных абонентов мобильной связи достигло 270 млн, из них 188 млн пользуются мобильным интернетом¹.

Рост масштабов и сложности телекоммуникационных систем приводит к существенному усложнению задач управления ими, что требует пересмотра традиционных подходов. В связи с этим международные организации, занимающиеся стандартизацией в области связи, такие как ITU-T (International Telecommunication Union – Telecommunication Standardization Sector), TM Forum (Tele Management Forum), 3GPP (The 3rd Generation Partnership Project), IETF (Internet Engineering Task Force) и ETSI (European Telecommunications Standards Institute), развивают новые концепции управления сетями, общей тенденцией которых является стремление с высокой степени автономности. Стоит отметить, что в документах этих организаций не упоминается использование цифровых двойников в системах управления телекоммуникационными сетями, однако указывается на предпосылки к их применению.

Среди наиболее значимых подходов следует отметить концепцию автономных сетей (Autonomous Networks), предложенную TM Forum, в рамках которой выделяются уровни зрелости автономности от L0 до L5²; концепцию управления и оркестрации без участия человека (ZSM, *аббр. от англ. Zero-touch Service Management*), разработанную ETSI и основанную на принципах замкнутого цикла автоматизации³; подход к управлению на основе намерений (IBN, *аббр. от англ. Intent-Based Networking*), развиваемый в рамках IETF, предполагающий преобразование высокоуровневых требований к функционированию сети в соответствующие конфигурационные параметры⁴; а также концепцию самоорганизующихся сетей (SON, *аббр. от англ. Self-Organizing Networks*), стандартизированную в 3GPP и реализующую механизмы самоконфигурирования и самовосстановления⁵.

В совокупности данные подходы ориентированы на реализацию замкнутых циклов автоматизации (closed-loop automation), управление на основе намерений (intent-driven management), повышение устойчивости функционирования сети за счет самовосстановления, а также использование методов предиктивного анализа.

¹ Итоги года для российской телеком-отрасли // Минцифры России: официальный сайт. 2025. URL: <https://digital.gov.ru/news/itogi-goda-dlya-rossijskoj-telekom-otrasli> (дата обращения 26.03.2026).

² Autonomous Networks: Empowering Digital Transformation for the Telecoms Industry. TM Forum, 2019. URL: <https://www.tmforum.org/wp-content/uploads/2019/05/22553-Autonomous-Networks-whitepaper.pdf> (Accessed 26.03.2026)

³ GS ZSM 006 V1.1.1. Zero-touch Network and Service Management (ZSM). Proof of Concept Framework. ETSI, 2018. 13 p.

⁴ RFC 9315. Intent-Based Networking. Concepts and Definitions. IETF, 2022. 23 p.

⁵ TS 32.500 V19.0.0. Telecommunication management. Self-Organizing Networks (SON). Concepts and Requirements. 3GPP, 2025. 13 p.

Несмотря на активное развитие указанных концепций, уровень их практической реализации остается ограниченным. Согласно аналитическим отчетам, большинство операторов связи находится на уровнях автономности L2–L3, при этом лишь 21 % достигает уровня L3 и выше⁶. Данное обстоятельство свидетельствует о необходимости развития практических инструментов управления, направленных на повышение степени автономности сетей.

Существующие инструменты управления, включая системы управления сетью (NMS, *аббр. от англ.* Network Management Systems), системы поддержки операционных / бизнес-процессов (OSS / BSS, *аббр. от англ.* Operations Support System / Business Support System), библиотеку ИТ-инфраструктуры / управление ИТ-сервисами (ITIL/ITSM, *аббр. от англ.* IT Infrastructure Library / IT Service Management), системы мониторинга и системы учета ресурсов сети, обладают рядом существенных ограничений. В частности, характерной особенностью таких решений является реактивный подход к управлению, при котором обработка инцидентов осуществляется постфактум. Кроме того, данные о состоянии сети, конфигурации и ресурсах, как правило, распределены между различными системами и не интегрированы в единую модель, что затрудняет анализ взаимосвязей. Процессы конфигурирования сетевого оборудования выполняются либо вручную, либо с использованием инструментов автоматизации, при этом изменения вносятся непосредственно в рабочую сеть без предварительного тестирования, что повышает вероятность возникновения отказов. Согласно отчету Annual Outage Analysis 2024, опубликованному Uptime Institute, доля сбоев серверной и сетевой инфраструктуры, вызванных ошибками конфигурации, составляет от 50 до 62 %⁷. Таким образом, дальнейшее развитие подходов к управлению телекоммуникационными сетями требует внедрения новых инструментов.

Постановка задачи

Для перехода к современным инструментам управления телекоммуникационными сетями предполагается применение цифровых двойников. Согласно определению Digital Twin Consortium, цифровой двойник представляет собой интегрированное виртуальное представление реальных объектов и процессов, основанное на данных, с синхронизированным взаимодействием с заданной частотой и степенью точности⁸. Данная технология уже зарекомендовала себя в различных отраслях промышленности включая энергетику, нефтегазовую отрасль, машиностроение, где она применяется для задач мониторинга, анализа и оптимизации функционирования сложных систем [1].

⁶ Wagner M. Telcos hit level 4 autonomous network milestone, says TM Forum // Fierce Network. 2026. URL: <https://www.fierce-network.com/cloud/telcos-hit-level-4-autonomous-network-milestone-says-tm-forum> (Accessed 26.03.2026).

⁷ Annual Outage Analysis 2024 Report // Uptime Institute. URL: <https://uptimeinstitute.com/resources/research-and-reports/annual-outage-analysis-2024> (Accessed 26.03.2026).

⁸ The Definition of a Digital Twin // Digital Twin Consortium. URL: <https://www.digitaltwinconsortium.org/> (Accessed 26.03.2026).

В последние годы наблюдается рост числа исследований, посвященных применению цифровых двойников в телекоммуникационных сетях⁹ [2–3]. При этом данное направление остается относительно новым и находится на стадии формирования. В частности, такие организации, как ITU-T, IETF, 3GPP, ведут разработку эталонных архитектур цифровых двойников для телекоммуникационных систем. Соответствующие документы носят преимущественно концептуальный характер и не содержат детализированных технических решений.

Ключевая цель данной работы состоит в анализе возможностей применения цифровых двойников в современных подходах к управлению телекоммуникационными сетями.

Подходы к анализу функций цифровых двойников телекоммуникационных сетей

Анализ функций цифровых двойников телекоммуникационных сетей основан на изучении рекомендаций ITU-T Y.3090 и научных публикаций, посвященных данной тематике. Согласно рекомендации ITU-T Y.3090, цифровой двойник сети определяется как виртуальная модель физической сети, предназначенная для анализа, диагностики, эмуляции и управления ее функционированием на основе данных, моделей и интерфейсов¹⁰. Ключевой особенностью цифрового двойника сети является обеспечение интерактивного отображения состояния физической сети в цифровой среде с заданной степенью актуальности данных.

В рамках данного подхода выделяются четыре основные характеристики цифрового двойника сети: данные, отображение, модель и интерфейсы (рисунок 1). Аналогичная структурная декомпозиция представлена в работе IETF, что свидетельствует о согласованности подходов к определению ключевых компонентов цифрового двойника сети¹¹.

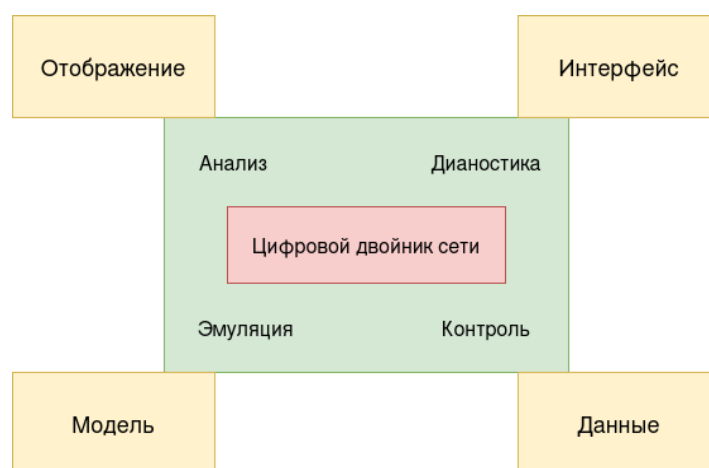


Рис. 1. Ключевые характеристики цифрового двойника сети

⁹ ITU-T Recommendation Y.3090. Digital Twin Network. Requirements and architecture. ITU-T, 2022. 26 p.; Zhou C., Yang H., Duan X., Lopez D., Pastor A., et al. Network Digital Twin Architecture // IETF: Internet Draft. 2025. URL: <https://www.ietf.org/archive/id/draft-irtf-nmrg-network-digital-twin-arch-10.txt> (Accessed 26.03.2026).

¹⁰ ITU-T Recommendation Y.3090. Digital Twin Network. Requirements and architecture...

¹¹ Zhou C., Yang H., Duan X., Lopez D., Pastor A., et al. Network Digital Twin Architecture...

Каждой из представленных выше характеристик соответствуют определенные функции:

- *данные* являются основой функционирования цифрового двойника сети; информация, поступающая из физической сети, агрегируется и сохраняется в цифровом представлении в виде единого репозитория, обеспечивающего достоверную и актуальную информационную базу для функционирования моделей;

- интерактивное *отображение* состояния между физической и цифровой сетью представляет собой ключевую характеристику цифрового двойника, отличающую его от традиционных систем моделирования; оно обеспечивает синхронизацию состояний с заданной степенью актуальности и позволяет использовать цифровой двойник для оперативного анализа и управления сетью;

- *модели* являются основным функциональным компонентом цифрового двойника сети; в цифровой среде могут применяться различные типы моделей, которые комбинируются и адаптируются в зависимости от решаемых задач, обеспечивая поддержку различных сценариев функционирования сети;

- стандартизированные *интерфейсы* обеспечивают взаимодействие между компонентами цифрового двойника, а также его интеграцию с внешними системами; они формируют основу масштабируемости и совместимости решения, при этом южные интерфейсы (southbound interface) обеспечивают взаимодействие с физической сетью, а северные интерфейсы (northbound interface) – с прикладными системами.

На основе указанных характеристик цифровой двойник сети формирует высокоточное цифровое представление физической и логической топологии сетевой инфраструктуры, что позволяет получать целостное представление о состоянии сети, а также осуществлять извлечение и анализ необходимой информации.

В рамках рекомендации ITU-T предлагается архитектура цифрового двойника сети (рисунок 2), которая включает три уровня: физической сети, цифрового двойника сети и прикладных систем¹².

Уровень физической сети охватывает совокупность устройств, взаимодействующих с цифровым двойником посредством южных интерфейсов, для работы которых могут применяться стандартизированные протоколы, такие как SNMP, CLI и NETCONF¹³. Объектом моделирования может выступать как сеть в целом, так и ее отдельные домены.

Уровень цифрового двойника сети является ядром системы и включает три ключевые подсистемы: единое хранилище данных, подсистему унифицированных моделей данных и систему управления цифровым двойником.

Единое хранилище данных обеспечивает сбор, обработку и хранение информации, поступающей из физической сети, формируя единый достоверный источник данных. В его состав входят сведения о пользователях и предоставляемых сервисах, состоянии оборудования, сетевых событиях, а также конфигурационных параметрах.

¹² ITU-T Recommendation Y.3090. Digital Twin Network. Requirements and architecture...

¹³ Zhou C., Yang H., Duan X., Lopez D., Pastor A., et al. Network Digital Twin Architecture...

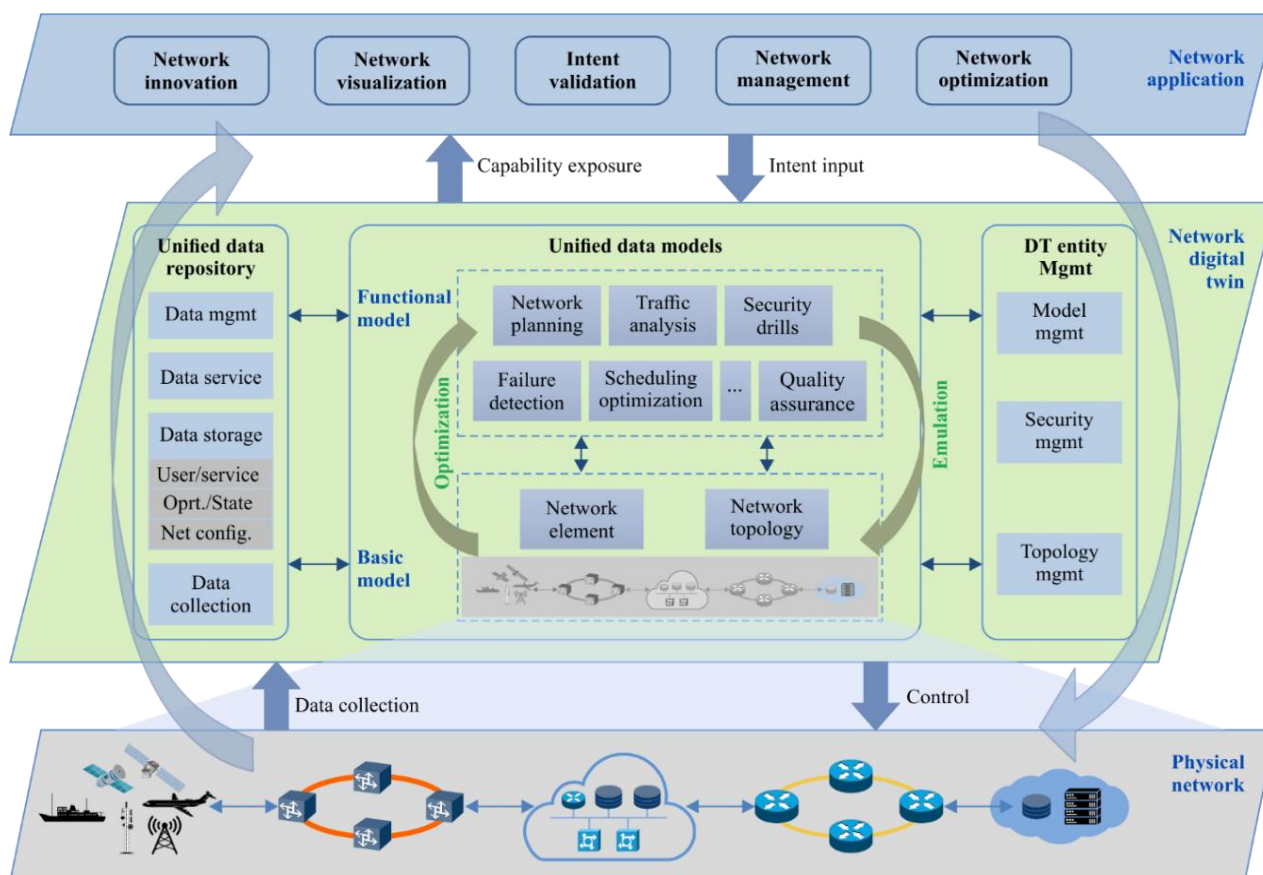


Рис. 2. Архитектура цифрового двойника сети

Подсистема унифицированных моделей данных предназначена для построения и использования моделей, применяемых в цифровом двойнике. Модели подразделяются на базовые и функциональные. Базовые модели обеспечивают формирование виртуального представления сети на основе конфигурационных параметров, операционных данных, структуры топологии, состояния соединений и иных характеристик. Для построения базовых моделей в сетях малого масштаба могут применяться инструменты имитационного моделирования и эмуляции, такие как NS-3, Mininet, EVE-NG и GNS-3, позволяющие оперативно проверять функционирование управляющей и пользовательской плоскостей¹⁴. Вместе с тем данный подход характеризуется рядом ограничений, включая высокие требования к вычислительным ресурсам и низкую масштабируемость.

В случае крупных телекоммуникационных сетей более эффективным является использование математических абстракций. Так, в публикации инженеров из Huawei описывается платформа NetGraph, предназначенная для построения цифровых двойников центров обработки данных [2]. В рамках предлагаемого подхода модель сети реализуется в виде графовой базы данных, в которой параметры устройств представлены в виде вершин, а взаимосвязи между ними – в виде ребер, что позволяет формировать модель сети на уровнях L2–L3. Применение данного решения в инфраструктуре центров обработки данных, включающей десятки тысяч сетевых устройств, обеспечивает возможность оперативного получения ин-

¹⁴ Zhou C., Yang H., Duan X., Lopez D., Pastor A., et al. Network Digital Twin Architecture...

формации о состоянии сети, функционировании протоколов и маршрутах передачи трафика за счет выполнения соответствующих запросов к базе данных. В работе [3] рассматривается разработанная исследователями из Google концепция многоуровневой топологии MALT (*аббр. от англ. Multi-Abstraction-Layer Topology*), которая разделяет представление сетевой инфраструктуры на несколько уровней абстракции (от высокоуровневых бизнес-ориентированных моделей до детальных физических реализаций) и предлагает более детализированный подход к построению модели сети, включающий уровень L1. В рамках данной модели в качестве вершин графа учитываются физические параметры передаваемого сигнала, характеристики пропускной способности интерфейсов и др., что позволяет повысить точность описания сетевой инфраструктуры и делает данный подход применимым для моделирования магистральных сетей связи.

Функциональные модели ориентированы на решение прикладных задач, включая анализ трафика, диагностику отказов, прогнозирование состояния сети и обеспечение качества обслуживания. Для их построения применяются методы машинного обучения, позволяющие учитывать сложные зависимости между параметрами сети. В ряде работ предлагаются модели на основе графовых нейронных сетей (RouteNet), а также методы ускоренного моделирования (MimicNet) [4–5]. Система управления цифровым двойником обеспечивает регулирование жизненным циклом цифрового представления сети, включая сопровождение топологии, моделей и параметров безопасности, а также реализацию функций визуализации и управления моделями. Применение методов сетевой верификации к данным цифрового двойника позволяет реализовать изолированную среду для тестирования протоколов и конфигурационных изменений до их внедрения в рабочую сеть [6]. На уровне прикладных систем размещаются программные решения, взаимодействующие с цифровым двойником посредством северных интерфейсов и обеспечивающие формирование управляющих воздействий на основе анализа моделей. В качестве сервисов могут выступать интеллектуальные инструменты, например системы класса «второго пилота» (co-pilot)¹⁵. Таким образом, приведенная архитектура цифрового двойника сети вкпе с рассмотренными технологиями позволяет повысить степень автоматизации управления сетью.

Заключение

Проведенный анализ показал, что цифровые двойники телекоммуникационных сетей являются эффективным инструментом для преодоления ограничений традиционных систем управления. В условиях роста трафика предложенная ITU-T архитектура обеспечивает целостное виртуальное представление сети и позволяет реализовать функции, необходимые для современных концепций управления, включая поддержку замкнутых циклов автоматизации (closed-loop automation), управление на основе намерений (intent-driven management), предиктивный анализ и безопасное тестирование конфигурационных изменений в изолированной среде.

¹⁵ Network Copilot: Value-Based ROI Framework for AI-Powered Network Operations // Aviz Networks. URL: <https://aviznetworks.com/report/network-copilot-value-based-roi-framework-for-ai-powered-network-operations/download> (Accessed 26.03.2026).

Цифровой двойник сети обладает высоким потенциалом для повышения автономности управления телекоммуникационными сетями. Дальнейшие исследования целесообразно направить на практическую адаптацию рекомендаций ITU-T к условиям российских операторов связи и на интеграцию с существующими инструментами управления.

Литература

1. Tao F., Zhang M. Digital Twin Shop-Floor: A New Shop-Floor Paradigm Towards Smart Manufacturing // IEEE Access. 2017. Vol. 5. PP. 20418–20427. DOI: 10.1109/ACCESS.2017.2756069
2. Hong H., Qin W., Feng D., Song W., Sun R., et al. NetGraph: An Intelligent Operated Digital Twin Platform for Data Center Networks // Proceedings of the ACM SIGCOMM 2021 Workshop on Network-Application Integration (NAI'21, August 23, 2021, Virtual Event, USA). PP. 26–32. DOI: 10.1145/3472727.3472802
3. Mogul J. C., Goricanec D., Pool M., Shaikh A., Turk D., et al. Experiences with Modeling Network Topologies at Multiple Levels of Abstraction // Proceedings of the 17th USENIX Symposium on Networked Systems Design and Implementation (NSDI'20, February 25–27, 2020, Santa Clara, USA) 2020. PP. 403–418. DOI: 10.1145/3472727.3472802
4. Rusek K., Suárez-Varela J., Almasan P., Barlet-Ros P., Cabellos-Aparicio A. RouteNet: Leveraging Graph Neural Networks for Network Modeling and Optimization in SDN // IEEE Journal on Selected Areas in Communications. 2020. Vol. 38. Iss. 10. PP. 2260–2270. DOI: 10.1109/JSAC.2020.3000405. EDN: HUPKWJ
5. Zhang Q., Kelvin K., Kazer C., Yan S., Sedoc J., et al. MimicNet: Fast Performance Estimates for Data Center Networks with Machine Learning // Proceedings of the 2021 ACM SIGCOMM Conference (August 23–27, 2021, Virtual Event, USA). 2021. PP. 287–304. DOI: 10.1145/3452296.3472926
6. Kazemian P., Chang M., Zeng H., Varghese G., McKeown N., et al. Real-Time Network Policy Checking Using Header Space Analysis // Proceedings of the 10th USENIX Symposium on Networked Systems Design and Implementation (NSDI'2013, April 2–5, 2013, Lombard, USA). 2013. PP. 99–111.

Статья поступила 15 апреля 2026 г.

Одобрена после рецензирования 21 мая 2026 г.

Принята к публикации 29 сентября 2026 г.

Информация об авторах

Елагин Василий Сергеевич – кандидат технических наук, доцент кафедры инфокоммуникационных систем Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича. E-mail: v.elagin@sut.ru

Андриевский Никита Константинович – студент магистратуры Института электроники и телекоммуникаций Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого. E-mail: andrievskynikita@gmail.com

<https://doi.org/10.31854/2307-1303-2026-14-3-1-10>
EDN: SVCCLM

Analysis of the Applicability of Digital Twins in the Management of Modern Telecommunication Networks

 V. Elagin¹,  N. Andrievskiy² 

¹The Bonch-Bruевич Saint Petersburg State University of Telecommunications,
St. Petersburg, 193232, Russian Federation

²Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University,
St. Petersburg, 195251, Russian Federation

Problem statement. The rapid growth of data traffic and the increasing complexity of telecommunication networks necessitate a transition to modern management approaches focused on enhancing autonomy and reducing human involvement. Traditional network management tools have a number of limitations that reduce their effectiveness within these new paradigms. Digital twins are considered one of the most promising tools for implementing modern network management concepts. **The purpose** of this study is to analyze the possibilities of applying digital twins in contemporary approaches to telecommunication network management. **Methods.** The research is based on the analysis of international standards and recommendations, as well as the generalization of recent scientific publications on digital twins of telecommunication networks. **Results.** The main results include a summary of the architecture of a network digital twin and its key components. It is shown that the use of digital twins enables the creation of a comprehensive virtual representation of the network, supports predictive analytics, implements closed-loop automation, and allows safe testing of configuration changes. **Theoretical relevance.** **The theoretical significance** of the work lies in substantiating the role of the network digital twin as a tool for implementing modern telecommunication network management approaches and in systematizing the key components and architectural principles of its construction.

Key words: network digital twin, network management tools, configuration changes, closed-loop automation, predictive analysis, network modeling, digital twin architecture

References

1. Tao F., Zhang M. Digital Twin Shop-Floor: A New Shop-Floor Paradigm Towards Smart Manufacturing // IEEE Access. 2017. Vol. 5. PP. 20418–20427. DOI: 10.1109/ACCESS.2017.2756069
2. Hong H., Qin W., Feng D., Song W., Sun R., et al. NetGraph: An Intelligent Operated Digital Twin Platform for Data Center Networks // Proceedings of the ACM SIGCOMM 2021 Workshop on Network-Application Integration (NAI'21, August 23, 2021, Virtual Event, USA). PP. 26–32. DOI: 10.1145/3472727.3472802
3. Mogul J. C., Goricanec D., Pool M., Shaikh A., Turk D., et al. Experiences with Modeling Network Topologies at Multiple Levels of Abstraction // Proceedings of the 17th USENIX Symposium on Networked Systems Design and Implementation (NSDI'20, February 25–27, 2020, Santa Clara, USA) 2020. PP. 403–418. DOI: 10.1145/3472727.3472802
4. Rusek K., Suárez-Varela J., Almasan P., Barlet-Ros P., Cabellos-Aparicio A. RouteNet: Leveraging Graph Neural Networks for Network Modeling and Optimization in SDN // IEEE Journal on Selected Areas in Communications. 2020. Vol. 38. Iss. 10. PP. 2260–2270. DOI: 10.1109/JSAC.2020.3000405. EDN: HUPKWJ

5. Zhang Q., Kelvin K., Kazer C., Yan S., Sedoc J., et al. MimicNet: Fast Performance Estimates for Data Center Networks with Machine Learning // Proceedings of the 2021 ACM SIGCOMM Conference (August 23–27, 2021, Virtual Event, USA). 2021. PP. 287–304. DOI: 10.1145/3452296.3472926

6. Kazemian P., Chang M., Zeng H., Varghese G., McKeown N., et al. Real-Time Network Policy Checking Using Header Space Analysis // Proceedings of the 10th USENIX Symposium on Networked Systems Design and Implementation (NSDI'2013, April 2–5, 2013, Lombard, USA). 2013. PP. 99–111.

Information about Authors

Elagin Vasiliy – Ph. D. of Engineering Sciences, Associate Professor, Head at the Department of Information and Communication Systems (The Bonch-Bruевич Saint Petersburg State University of Telecommunications). E-mail: v.elagin@sut.ru

Andrievskiy Nikita – Master's student of Institute of Electronics and Telecommunications (Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University). E-mail: andrievskynikita@gmail.com