

DOI 10.24412/2221-2574-2023-3-44-52

УДК 004.77

## ЦИФРОВЫЕ ДВОЙНИКИ СЕТЕВЫХ ИНФРАСТРУКТУР: ТОЧНОСТЬ, МЕТОДЫ И ПРАКТИЧЕСКИЕ РЕШЕНИЯ

**Уймин Антон Григорьевич**

аспирант, ФГБОУ ВО «Владимирский Государственный университет имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых».

E-mail: [au-mail@ya.ru](mailto:au-mail@ya.ru)

Адрес: 600000, Российская Федерация, г. Владимир, ул. Горького, д. 87.

*Аннотация:* В статье рассматривается создание и тестирование цифрового двойника сетевой инфраструктуры на Linux-сервере с помощью виртуализации KVM и инструмента OpenvSwitch. Работа подчеркивает важность точности сетевых цифровых двойников для современного сетевого и системного администрирования, предлагая практические решения для её обеспечения. Исследование включает создание цифрового двойника сети и проведение ряда тестов с использованием различных методов сравнения и анализа. Результаты исследования показали, что в большинстве случаев виртуальная сеть ведёт себя аналогично реальной, но также были выявлены и некоторые различия. Предложена формула для вычисления коэффициента соответствия, позволяющего оценить точность воспроизведения поведения реальной сети цифровым двойником. Подчеркивается необходимость периодической перепроверки и обновления весов тестов и метрик ошибок для поддержания точности и актуальности метода.

*Ключевые слова:* Цифровой двойник сетевой инфраструктуры, Linux-сервер, виртуализация KVM, Open vSwitch, виртуальные сетевые топологии, точность моделей, сравнение реальной и виртуальной сети.

### Введение

В современном мире, где информационные технологии проникают во все сферы жизни, сетевые инфраструктуры становятся всё более сложными и многообразными. От корпоративных сетей до глобальных облачных сервисов, эти инфраструктуры играют ключевую роль в поддержании бесперебойной работы многих систем, что включает в себя не только предприятия и организации, но и общественные услуги. Однако управление и поддержка таких сложных сетей становятся всё более трудоёмкими и специализированными задачами. В этом контексте концепция сетевых цифровых двойников предлагает новый и эффективный подход к управлению и оптимизации сетевыми инфраструктурами.

Телекоммуникационная сеть (telecommunication network): Передающая среда, заканчивающаяся проводной линией, предназначенной для связи между оборудованием, которое может быть размещено в различных зданиях, исключая:

- магистральную систему для электропитания, передачи и распределения электрической

энергии, если она используется как передающая среда связи

- системы кабельного распределения;
- цепи БСНН, соединяющие модули оборудования обработки данных<sup>1</sup>.

Телекоммуникационные сети могут быть различного масштаба, от небольших локальных сетей (LAN), которые соединяют устройства в одном здании или на одном участке, до широко распространенных городских вычислительных сетей (MAN), распространяющихся на несколько зданий или город, и даже до глобальных сетей, таких как Интернет, которые соединяют устройства по всему миру.

Основные компоненты телекоммуникационной сети включают терминальное оборудование (например, телефоны, компьютеры и другие устройства, которые генерируют и получают информацию), передающее оборудование (например, модемы, коммутаторы и маршрутизаторы, которые преобразуют и направляют информацию), и телекоммуникационные кана-

<sup>1</sup> ГОСТ Р МЭК 60950-1-2009: Оборудование информационных технологий. Требования безопасности.

лы (например, провода, оптоволоконные кабели, радиоволны и спутниковые каналы, которые передают информацию между устройствами).

Телекоммуникационные сети играют ключевую роль в современном обществе, обеспечивая основу для широкого спектра услуг и приложений, включая телефонию, Интернет, мобильную связь, телевидение, радио, телемедицину, образовательные платформы и многое другое.

Сетевой цифровой двойник (Network Digital Twin) [1] — это виртуальная модель реальной сети, которая воспроизводит её структуру, функциональность и поведение. Это позволяет администраторам и инженерам проводить эксперименты, тестировать новые конфигурации и решать проблемы без воздействия на реальную сеть. Сетевые цифровые двойники могут быть особенно полезны в сложных и динамичных сетевых средах, где изменения происходят быстро и требуются постоянные тесты и адаптации.

Основные характеристики сетевого цифрового двойника включают его способность воспроизводить структуру и топологию реальной сети, эмулировать функциональность сетевых устройств и сервисов, и моделировать поведение сети при различных условиях. Это может включать в себя моделирование сетевого трафика, загрузки сети, уровня отказоустойчивости, уровня безопасности и других ключевых аспектов работы сети.

При построении сетевого цифрового двойника на Linux-сервере с использованием KVM виртуализации и OpenvSwitch, могут возникнуть некоторые отличия между реальной и виртуальной сетью. Это может быть связано с различиями в производительности, конфигурации, обновлениях и патчах, сетевых протоколах, виртуальном окружении, физических ограничениях, а также процессах тестирования и отладки [2].

Например, виртуальная сеть может иметь ограниченную производительность по сравнению с реальной сетью из-за ограничений виртуализации. Конфигурация виртуальной сети может отличаться от реальной из-за различий в

программном обеспечении и оборудовании. Обновления и патчи могут быть применены к реальной сети, но не к виртуальной, что может привести к различиям в поведении. Важно поддерживать обе среды — и реальную, и виртуальную — в актуальном состоянии, чтобы обеспечить их соответствие. Сетевые протоколы могут работать по-разному в виртуальной среде. Например, некоторые протоколы, которые опираются на тайминг или физические характеристики сети, могут работать иначе или не работать вовсе в виртуальной среде.

Физические ограничения, такие как задержка и пропускная способность, также могут различаться между реальной и виртуальной средами из-за ограничений оборудования и программного обеспечения виртуализации.

Оценивание производительности является одним из наиболее прямых способов сравнения реальной и виртуальной сети. Это включает в себя измерение различных метрик производительности, таких как пропускная способность, задержка, потери пакетов и другие. Эти метрики затем сравниваются между реальной и виртуальной сетью, чтобы определить степень соответствия. Они также могут быть использованы для предсказания возможного поведения сети при изменении различных параметров.

Моделирование сети включает в себя создание математической или компьютерной модели сети, которая может быть использована для предсказания поведения сети в различных сценариях. Эта модель затем сравнивается с реальной и виртуальной сетью, чтобы определить степень соответствия.

Статистический анализ включает сбор и анализ данных о сетевом трафике и работе сети в целом, чтобы определить ключевые статистические характеристики, такие как среднее значение, дисперсия, корреляция и другие. Эти характеристики затем сравниваются между реальной и виртуальной сетью, чтобы определить степень соответствия.

Методы машинного обучения могут быть применены для создания прогностических моделей, которые на основе исторических данных

могут предсказывать поведение сети. Эта модель затем сравнивается с реальной и виртуальной сетью, чтобы определить степень соответствия.

Теория графов может быть использована для моделирования структуры сети и анализа свойств сети, таких как связность, диаметр, степень вершин и другие. Эти свойства затем сравниваются между реальной и виртуальной сетью, чтобы определить степень соответствия.

Каждый из этих методов имеет свои преимущества и недостатки, и выбор конкретного метода будет зависеть от специфических требований и условий проекта. Однако, комбинирование этих методов может помочь создать более точную и полную модель сетевого цифрового двойника.

Использование сетевых цифровых двойников представляет собой серьёзный вызов, особенно в области точности моделирования. Одним из ключевых аспектов, требующих внимания, является точность виртуальной модели. Любые отличия между реальной и виртуальной сетью могут привести к непредвиденным последствиям, таким как некорректное поведение системы, неправильное принятие решений или недостаточно точные результаты тестирования. Поэтому важно разработать эффективные методы и метрики для обеспечения и проверки точности сетевых цифровых двойников [3].

В данной статье мы исследуем эту проблему, сосредоточив внимание на построении цифрового двойника сетевой инфраструктуры на Linux-сервере с использованием технологии виртуализации KVM (Kernel-based Virtual Machine) и сетевого инструмента OpenvSwitch для создания сложных виртуальных сетевых топологий. Мы рассмотрим основные характеристики и функции сетевого цифрового двойника, а также потенциальные отличия между реальной и виртуальной сетью. Мы также обсудим методы и метрики, которые могут быть использованы для обеспечения и проверки точности этих моделей.

Целью работы является обоснование важности точности сетевых цифровых двойников и

предложение практических решений для управления этим важным аспектом с акцентом на применение этих технологий в контексте современного сетевого и системного администрирования.

### **Обзор литературы**

Концепция цифровых двойников произвела революцию в различных отраслях промышленности, обеспечив возможность моделирования и симуляции сложных систем в режиме реального времени. В данном обзоре литературы рассматриваются различные аспекты технологии цифровых двойников и её применение в сетевых инфраструктурах, цепочках поставок, промышленном производстве и киберфизических системах.

Истоки концепции цифрового двойника можно проследить в научной фантастике и программе «Аполлон», где он был впервые представлен как синхронизированное цифровое представление реального объекта [4]. С тех пор технология цифровых двойников развивалась и получила распространение во многих областях.

Одной из областей применения является управление современными коммуникационными сетями с использованием сетевых цифровых двойников (NDT). NDT представляют собой инструменты моделирования сетей на основе данных, которые работают в режиме реального времени и облегчают управление коммуникационными сетями с возникающими приложениями [1]. Эти инструменты предлагают потенциал для оптимизации маршрутизации и улучшения распределения ресурсов в промышленных сетях интернета вещей (IIoT) [5, 6].

В контексте сетей 5G и последующих сетей структура B5GEMINI представляет NDT, использующий технологии искусственного интеллекта (ИИ) и машинного обучения (МЛО) [7]. В статье обсуждаются инфраструктура, приложения и экосистема ИИ B5GEMINI, выделяются примеры использования в кибербезопасности и энергоэффективности компонентов ИИ.

Преимущества цифровизации и моделирования цифровых двойников логистических сетей

исследуются в контексте неразрушающего контроля качества и Индустрии 4.0 [8]. Данное исследование подчеркивает преимущества цифровизации цепи поставок и отражения всего жизненного цикла продукции, выделяя преимущества для участников с точки зрения цифровизации и рыночной конкуренции.

Кроме того, Принципы Близнецов (Gemini Principles) обеспечивают ценностный подход к цифровым двойникам и оценивают их присутствие в опубликованной литературе [9]. Моделирование, контроль, эффективность и мониторинг здоровья конструкций определены как преобладающие мотивы, в то время как таким принципам, как общественное благо, безопасность, устойчивость и сотрудничество уделяется меньше внимания.

Технология цифровых двойников находит применение не только в сетевых инфраструктурах. В сфере промышленного производства внедрение цифровых двойников признано тенденцией, имеющей значительные преимущества в контексте цифровизации и сетевого взаимодействия [10]. В статье освещается потенциал цифровых двойников для цифровых проектов в промышленном производстве и обсуждаются приоритетные направления инновационной деятельности в отрасли.

Принципы, рабочий процесс и примеры применения технологии цифрового двойника в различных отраслях, например, в железнодорожном транспорте, также активно изучаются [11]. В работах подчеркивается интеграция таких технологий, как Интернет вещей, Edge Analytics и Big Data, для достижения виртуального представления характеристик реального мира и повышения автономности, надёжности и стабильности системы.

Концепция цифровых двойников распространяется и на другие области, включая здания и гражданскую инфраструктуру [12]. Интеграция информационного моделирования зданий (BIM), систем бережливого производства проектов, автоматизированного сбора данных и искусственного интеллекта позволяет создавать

замкнутые системы управления и улучшать строительные процессы.

Для киберфизических систем и сетей IoT предложена структура цифрового двойника с децентрализованной реализацией [13]. Эта структура позволяет осуществлять моделирование и мониторинг в реальном времени, обучение с усилением на основе политики и без неё, а также реализовать архитектуру нулевого доверия для коммуникационных сетей, управляемых данными. Особое внимание уделяется сети тактовой синхронизации, как ключевой составляющей сетей связи [14].

Таким образом, литература по цифровым двойникам охватывает широкий спектр приложений и областей. От сетевых инфраструктур и цепочек поставок до промышленного производства и киберфизических систем, цифровые двойники предлагают инновационные решения для моделирования, симуляции и оптимизации в реальном времени. Интеграция ИИ, ОД и других передовых технологий расширяет их возможности и прокладывает путь для будущих достижений в различных отраслях.

### Материалы и методы

*Описание инструментов и оборудования:* для создания сетевого цифрового двойника использовался сервер с поддержкой виртуализации на уровне аппаратного обеспечения. Такой сервер должен обладать достаточной вычислительной мощностью, объёмом оперативной памяти и местом на диске для вмещения и эффективного функционирования всех виртуальных машин, используемых в эксперименте. Оптимальными параметрами сервера могут быть: 32-ядерный процессор, 64 GB оперативной памяти и SSD на 1 TB [15].

*Описание программного обеспечения:* на сервере установлена Proxmox в качестве основной платформы виртуализации, одна из виртуальных машин в свою очередь использовала KVM и OpenvSwitch для создания виртуальных сетей. В качестве виртуальных машин применены экземпляры различных операционных систем, включая Astra Linux 1.7, RedOS 7.3,

Debian 11, Windows 10, Windows Server 2019 GUI, IOSv, IOSvL2, VyOS 1.4, и Huawei USG (см. рис. 1).

*Процедуры сбора данных:* Данные о работе виртуальной сети собирались посредством встроенных средств мониторинга Proxmox, KVM и OpenvSwitch. Это включало сбор данных о производительности виртуальных машин, статистики сетевого трафика, а также данных об использовании процессора, памяти и дискового пространства. Дополнительно, использовались средства мониторинга и анализа трафика, встроенные в операционные системы виртуальных машин [16].

*Методы анализа данных:* Собранные данные анализировались с использованием различных статистических методов для определения ключевых характеристик работы сети, таких как средняя загрузка сети, времена ответа и про-

пускная способность. Также использовались методы машинного обучения для моделирования работы сети и предсказания её поведения под различными условиями.

*Методы валидации:* Валидация модели сетевого цифрового двойника проводилась путём сравнения работы реальной и виртуальной сети. Для этого использовались метрики, такие как задержка, пропускная способность, потери пакетов и другие показатели производительности. Также проводились сценарные тесты для проверки поведения сети в условиях различных рабочих нагрузок и сбоев.

### Результаты

В этом разделе мы применим методы сравнения, описанные в предыдущем разделе, к конкретным реальной и виртуальной сетям, построенным на Linux-сервере. Мы опишем

процесс сравнения и представим полученные результаты.

Сначала мы создали цифровой двойник нашей сети, используя Proxmox, KVM и OpenvSwitch на Linux-сервере. Затем мы провели серию тестов, используя каждый из описанных методов сравнения. Это включало сравнение производительности, моделирование сети, статистический анализ, применение методов машинного обучения и анализ с использованием теории графов.

В данном разделе мы проанализируем полученные результаты и интерпретируем их. Мы обсудим степень соответствия характеристик и поведения реальной и виртуальной

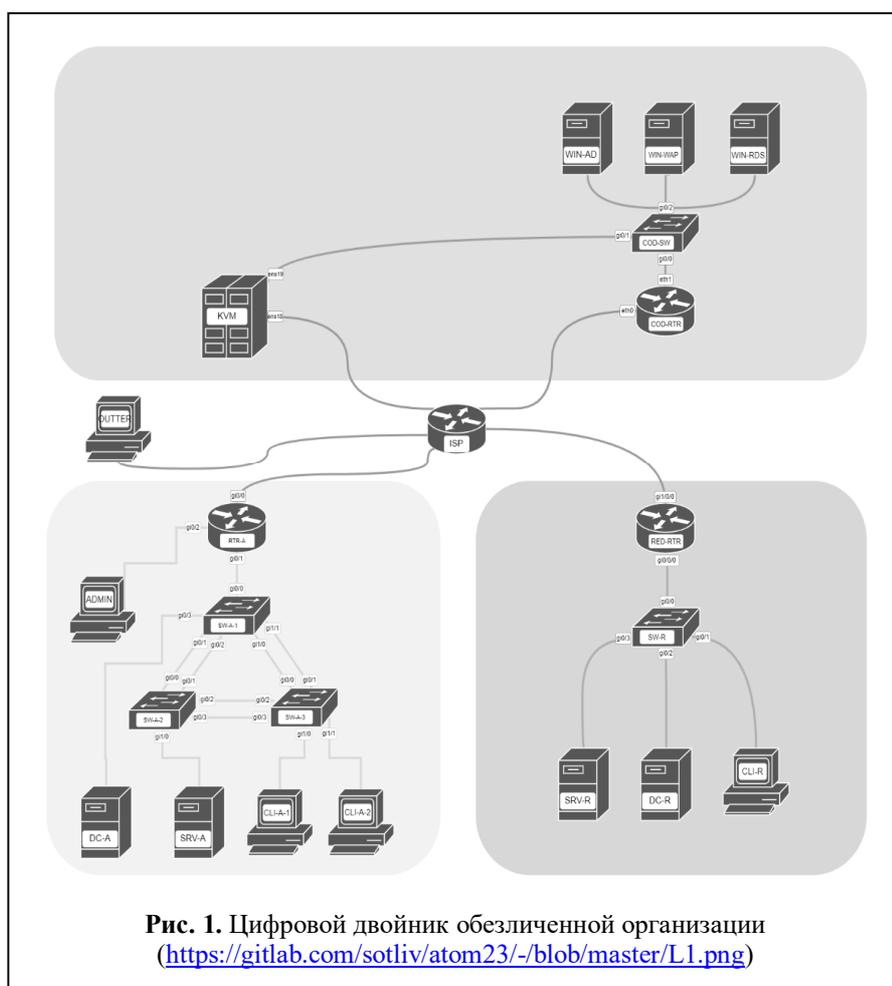


Рис. 1. Цифровой двойник обозначенной организации (<https://gitlab.com/sotliv/atom23/-/blob/master/L1.png>)

сетей, а также рассмотрим возможные причины обнаруженных различий.

После анализа результатов, мы обнаружили, что в большинстве случаев виртуальная сеть ведёт себя аналогично реальной сети. Однако были обнаружены некоторые различия, которые могут быть связаны с различными факторами, такими как конфигурация сети, обновления и патчи, сетевые протоколы, виртуальное окружение и физические ограничения.

В этом разделе мы оценим точность сетевого цифрового двойника на основе полученных результатов. Мы обсудим возможные способы улучшения точности, такие как оптимизация конфигурации сети, учёт последних обновлений и патчей, а также уточнение параметров виртуального окружения. Кроме того, предложим формулу для коэффициента соответствия, который будет учитывать все ошибки и результаты тестов.

Для оценки цифровых сетевых двойников, можно использовать следующую методологию:

1. Тест производительности. Этот тест позволяет оценить, насколько хорошо цифровой двойник моделирует реальный объект или систему. Тест может включать сравнение выходных данных модели с реальными данными, а также проверку времени отклика модели и скорости обработки данных.

2. Тест конфигурации. Цель этого теста — убедиться, что цифровой двойник правильно настроен и соответствует спецификациям и требованиям реальной системы. Можно проверить, соответствуют ли параметры модели реальной системе и правильно ли они настроены.

3. Тест обновлений и патчей. Этот тест проверяет, как модель реагирует на обновления и патчи. То есть, оценивается, можно ли без проблем применить обновления и исправления к модели и как они влияют на производительность.

4. Тест сетевых протоколов. Проверка корректности работы сетевых протоколов и обеспечения безопасности обмена данными. Это может включать тестирование на наличие уязвимостей, проверку правильности работы про-

**Таблица 1.** Веса тестов производительности реальной и виртуальной инфраструктур

Тест	Вес
Тест производительности	0,3
Тест конфигурации	0,2
Тест обновлений и патчей	0,1
Тест сетевых протоколов	0,2
Тест виртуального окружения	0,1
Тест физических ограничений	0,1

токолов и оценку производительности сети.

5. Тест виртуального окружения. Проверка, насколько хорошо виртуальное окружение моделирует реальное окружение. Можно проверить, насколько точно модель воссоздаёт физические свойства и условия окружения, а также, как она реагирует на изменения в окружении.

6. Тест физических ограничений. Этот тест оценивает, насколько хорошо модель учитывает физические ограничения и правила реальной системы. Это может включать тестирование модели в экстремальных условиях, которые могут возникнуть в реальности.

Вес каждого теста отражает его важность в общем контексте оценки точности сетевого цифрового двойника. Сумма весов всех тестов равна 1.

Выбор весов для каждого теста в нашем случае основан на их относительной важности в контексте точности сетевого цифрового двойника (экспертная оценка). Однако, может потребоваться метод, который позволяет перераспределить веса на основе важности каждого теста для конкретного предприятия. Один из способов сделать это — использовать байесовский подход, который позволит вам динамически адаптировать веса на основе предыдущего опыта или знаний о конкретном предприятии.

Формула для байесовского переопределения весов будет выглядеть так:

$$w_{i_{нов}} = \frac{w_{i_{исх}} \times P_{усп_{нов}}}{P_{усп_{исх}}},$$

где  $w_{i_{нов}}$  — новый вес;  $w_{i_{исх}}$  — исходный вес;

$P_{усп_{нов}}$  — вероятность, что тест будет успешным,

на основе собранных данных;  $P_{успех}$  — вероятность успешности теста, рассчитанная на основе старого веса.

Важно отметить, что эти веса могут быть адаптированы в зависимости от конкретного контекста и требований к точности сетевого цифрового двойника.

Введём понятие метрики ошибки, которая представляет собой численное значение, отражающее степень отклонения результатов теста в виртуальной сети от результатов в реальной сети. Вычисление этого значения может варьироваться в зависимости от типа теста и генерируемых им данных.

Один из распространённых подходов к вычислению метрики ошибки — использование среднеквадратической ошибки, которая часто применяется в статистике и машинном обучении:

$$E_i = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n (y_{real,j} - y_{virtual,j})^2,$$

где  $E_i$  — метрика ошибки  $i$ -го теста;  $n$  — количество измерений в тесте;  $y_{real,j}$  —  $j$ -е измерение в реальной сети;  $y_{virtual,j}$  —  $j$ -е измерение в виртуальной сети.

Основываясь на наших исследованиях и анализе, мы предлагаем следующую формулу для коэффициента соответствия (СС):

$$C = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N w_i \times (1 - E_i),$$

где  $C$  — коэффициент соответствия;  $N$  — количество тестов;  $w_i$  — вес  $i$ -го теста;  $E_j$  — метрика ошибки  $i$ -го теста, которая может быть в диапазоне от 0 (тест пройден без ошибок) до 1 (тест не пройден).

Малые значения  $E_j$  указывают на высокую степень соответствия между виртуальной и реальной сетью, и наоборот, большие значения  $E_j$  указывают на большие отклонения. Таким образом, СС близкий к 1 указывает на высокую точность цифрового двойника, а СС близкий к 0 указывает на низкую точность.

Для нашего примера виртуальной сети коэффициент соответствия при описанных выше

весах составил 0,96, что свидетельствует о качественной проработке и настройке описанного цифрового двойника.

### Обсуждение и выводы

На основании проведённого исследования и сравнения реальной и виртуальной сети мы можем сделать несколько ключевых выводов и предложений.

Наша методика, включающая использование цифрового двойника, Proxmox, KVM и OpenvSwitch на Linux-сервере, позволила провести глубокий анализ и сравнение сетей. Результаты, полученные в ходе исследования, демонстрируют, что в большинстве случаев виртуальная сеть ведёт себя аналогично реальной сети. Однако, были выявлены и некоторые отклонения, которые могут быть связаны с различными факторами, включая конфигурацию сети, обновления и патчи, сетевые протоколы, виртуальное окружение и физические ограничения.

Мы предложили формулу для вычисления коэффициента соответствия (СС), который позволяет количественно оценить точность воспроизведения поведения реальной сети цифровым двойником. СС учитывает результаты различных тестов и их веса, предоставляя комплексную оценку точности. Малые значения  $E_j$  и, следовательно, высокие значения СС указывают на высокую точность цифрового двойника, и наоборот.

Тем не менее, необходимо учитывать, что точность цифрового двойника может быть подвержена изменениям в зависимости от изменения конкретного контекста и требований к точности. Это подчёркивает необходимость периодической перепроверки и обновления весов тестов и метрик ошибок.

Таким образом, наш подход к сравнению реальной и виртуальной сети с использованием цифровых двойников показал себя как эффективный и достаточно точный метод. Однако, как и любой метод, он требует постоянного мониторинга и обновления для поддержания своей актуальности и точности.

Литература

1. *Almasan P. et. al.* Network Digital Twin: Context, Enabling Technologies, and Opportunities // IEEE Communications Magazine. 2022. Vol. 60. No. 11. Pp. 22–27.
2. *Prabhu N.* Network Virtualization and Emulation using Docker, OpenvSwitch and Mininet-based Link Emulation: Masters Theses [Электронный ресурс]. URL: [https://scholarworks.umass.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=2016&context=masters\\_theses\\_2](https://scholarworks.umass.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=2016&context=masters_theses_2) (дата доступа 14.03.2023).
3. *Wu Y., Zhang K., Zhang Y.* Digital twin networks: A survey // IEEE Internet of Things Journal. 2021. Vol. 8. No. 18. Pp. 13789–13804.
4. *Öhlén P. et. al.* Network digital twins—outlook and opportunities // Ericsson Technology Review. 2022. Vol. 2022. No. 12. Pp. 2–11.
5. *Kherbache M., Maimour M., Rondeau E.* Network Digital Twin for the Industrial Internet of Things // 2022 IEEE 23rd International Symposium on a World of Wireless, Mobile and Multimedia Networks (WoWMoM). IEEE, 2022. Pp. 573–578.
6. *Jagannath J., Ramezanpour K., Jagannath A.* Digital twin virtualization with machine learning for IoT and beyond 5G networks: research directions for security and optimal control // Proceedings of the 2022 ACM Workshop on Wireless Security and Machine Learning. 2022. Pp. 81–86.
7. *Mozo A. et. al.* B5GEMINI: AI-driven network digital twin // Sensors. 2022. Vol. 22. No. 11: 4106. DOI: [10.3390/s22114106](https://doi.org/10.3390/s22114106)
8. *Kapustina I. et. al.* The logistics network digital twin in view of concept of the non-destructive quality control methods // E3S Web of Conferences. EDP Sciences, 2020. Vol. 157: 0500. 8 p.
9. *Lamb K.* Principle-based digital twins: a scoping review [Электронный ресурс]. 2019. URL: <https://api.repository.cam.ac.uk/server/api/core/bitstreams/bd668ac9-bdd3-487f-a371-f0113f3de732/content> (дата доступа 14.03.2023).
10. *Цёхла С.Ю., Симченко Н.А., Моисеенко В.А.* Сетевое проектирование внедрения цифровых двойников в промышленности // Вестник Северо-Кавказского федерального университета. 2020. № 3. С. 106–112.
11. *Курганова Н. В. и др.* Внедрение цифровых двойников как одно из ключевых направлений цифровизации производства // International journal of open information technologies. 2019. Т. 7. № 5. С. 105–115.
12. *Kherbache M., Maimour M., Rondeau E.* When digital twin meets network softwarization in the industrial IoT: real-time requirements case study // Sensors. 2021. Т. 21. № 24: 8194. DOI: [10.3390/s21248194](https://doi.org/10.3390/s21248194)
13. *Sacks R. et. al.* Construction with digital twin information systems // Data-Centric Engineering. 2020. Vol. 1:e14. Pp. 1–26.
14. *Лобастова М.В., Матюхин А.Ю.* Оценка надёжности работы элемента сети тактовой сетевой синхронизации // Радиотехнические и телекоммуникационные системы. 2020. № 3 (39). С. 27–36.
15. *Уймин А. Г., Токарев Г. И.* Инструментальные средства обучения компьютерным сетям. Развёртывание на базе российского программного обеспечения // Системы управления и информационные технологии. 2022. № 4 (90). С. 88.
16. *Уймин А. Г.* Автоматическое маркирование сетевого трафика браузера для анализа и классификации на примере платформы "REMOTETOPOLOGY" // Т-Comm – Телекоммуникации и Транспорт. 2022. Т. 16. № 12. С. 17–22.

Поступила 21 марта 2023 г.

English

DIGITAL TWINS OF NETWORK INFRASTRUCTURES: ACCURACY, METHODS AND PRACTICAL SOLUTIONS

**Anton Grigorievich Uymin** — Postgraduate Student, Department of Radio Engineering and Radio Systems “Vladimir State University named after A.G. and N.G. Stoletovs”.

E-mail: [au-mail@ya.ru](mailto:au-mail@ya.ru)

Address: 600000, Russian Federation, Vladimir, Gorky St., 87.

*Abstract:* Development of exact digital twins of network infrastructure is an important task in today's network and system administration. We focused on building such twins on Linux-hosted server using KVM and OpenvSwitch virtualizing technologies in our research. There was made a comprehensive analysis and comparison of real-mode and virtual networks, including performance comparison, network simulation, statistical analysis and application of machine learning methods. The research showed that the virtual network behavior is similar to the real-mode one in most cases. However, there were found some deviations thus stressing the importance of accuracy in simulation and the requirement for ongoing updating and recheck of the methods and metrics used. A formula was proposed for calculating the matching coefficient as part of the research, which enables to quantify the simulation accuracy of a real-mode network behavior by a digital twin. The matching coefficient for our example of virtual network was 0.96, with weights described in the paper,

which indicates the high-quality development and tuning of the described digital twin. Thus, the proposed methods using a digital twin and Linux-host server technologies made it possible to analyze and compare networks. Mostly, virtual and real-mode networks behave alike, but there were observed some deviations, presumably related to network configuration, updates and patches, network protocols, virtual environment, and physical limitations. The research is an important step towards development of accurate and reliable digital twins of network infrastructure, which undoubtedly promotes improvement and efficiency of today's network and system administration.

**Keywords:** Digital twin of Network Infrastructure, Linux-host server, KVM virtualization, Open vSwitch, virtual network topologies, model accuracy, comparison of real-mode and virtual networks.

### References

1. *Almasan P. et. al.* Network Digital Twin: Context, Enabling Technologies, and Opportunities. IEEE Communications Magazine. 2022. Vol. 60. No. 11. Pp. 22–27.
2. *Prabhu N.* Network Virtualization and Emulation using Docker, OpenvSwitch and Mininet-based Link Emulation: Masters Theses [Electronic source]. URL: [https://scholarworks.umass.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=2016&context=masters\\_theses\\_2](https://scholarworks.umass.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=2016&context=masters_theses_2) (Access date 14.03.2023).
3. *Wu Y., Zhang K., Zhang Y.* Digital twin networks: A survey. IEEE Internet of Things Journal. 2021. Vol. 8. No. 18. Pp. 13789–13804.
4. *Öhlén P. et. al.* Network digital twins—outlook and opportunities. Ericsson Technology Review. 2022. Vol. 2022. No. 12. Pp. 2–11.
5. *Kherbache M., Maimour M., Rondeau E.* Network Digital Twin for the Industrial Internet of Things. 2022 IEEE 23rd International Symposium on a World of Wireless, Mobile and Multimedia Networks (WoWMoM). IEEE, 2022. Pp. 573–578.
6. *Jagannath J., Ramezanpour K., Jagannath A.* Digital twin virtualization with machine learning for IoT and beyond 5G networks: research directions for security and optimal control. Proceedings of the 2022 ACM Workshop on Wireless Security and Machine Learning. 2022. Pp. 81–86.
7. *Mozo A. et. al.* B5GEMINI: AI-driven network digital twin. Sensors. 2022. Vol. 22. No. 11: 4106. DOI: [10.3390/s22114106](https://doi.org/10.3390/s22114106)
8. *Kapustina I. et. al.* The logistics network digital twin in view of concept of the non-destructive quality control methods. E3S Web of Conferences. EDP Sciences, 2020. T. 157: 05001 (8 c.).
9. *Lamb K.* Principle-based digital twins: a scoping review [Electronic source]. 2019. URL: <https://api.repository.cam.ac.uk/server/api/core/bitstreams/bd668ac9-bdd3-487f-a371-f0113f3de732/content> (Access date 14.03.2023).
10. *Tsyokhla S. Yu., Simchenko N. A., Moiseenko V. A.* Network design of the implementation of digital twins in industry. Vestnik Severo-Kavkazskogo federal'nogo universiteta. 2020. No. 3. Pp. 106–112.
11. *Kurganova N. V. et. al.* Digital twins' introduction as one of the major directions of industrial digitalization. International journal of open information technologies. 2019. Vol. 7. No. 5. Pp. 105–115.
12. *Kherbache M., Maimour M., Rondeau E.* When digital twin meets network softwarezation in the industrial IoT: real-time requirements case study. Sensors. 2021. Vol. 21. No. 24.: 8194. DOI: [10.3390/s21248194](https://doi.org/10.3390/s21248194)
13. *Sacks R. et. al.* Construction with digital twin information systems. Data-Centric Engineering. 2020. Vol. 1. : e14. Pp. 1–26.
14. *Lobastova M.V., Matyukhin A.Yu.* Assessment of the reliability of the network element of clock network synchronization. Radioengineering and telecommunication systems. 2020. No. 3 (39). Pp. 27–36.
15. *Uymin A. G., Tokarev G. I.* Toolkits for teaching computer networks. Deployment based on Russian software. Sistemy upravleniya i informatsionnye tekhnologii. 2022. No. 4 (90). Pp. 88.
16. *Uymin A. G.* Automatic marking of browser network traffic for analysis and classification on the example of "REMOTETOPOLOGY" platform. T-Comm-Telekommunikatsii i Transport. 2022. Vol. 16. No. 12. Pp. 17–22.