

РАДИОТЕХНИКА И СВЯЗЬ

Научная статья
УДК 621.396
DOI: [10.34759/trd-2022-125-13](https://doi.org/10.34759/trd-2022-125-13)

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ВРЕМЕННОЙ ЗАДЕРЖКИ ТЕЛЕКОММУНИКАЦИОННОГО ОБОРУДОВАНИЯ STP И SDN

**Игорь Геннадьевич Бужин¹✉, Вероника Михайловна Антонова²,
Юрий Борисович Миронов³, Варвара Александровна Антонова⁴,
Эльдар Альбертович Гайфутдинов⁵**

^{1,3,4,5}Московский технический университет связи и информатики, МТУСИ,
Москва, Россия

² Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН, Москва, Россия

¹i.g.buzhin@mtuci.ru✉

²xarti@mail.ru

³i.b.mironov@mtuci.ru

⁴varvara_zi@mail.ru

⁵e.a.gaifutdinov@mtuci.ru

Аннотация. В статье рассмотрена архитектура программно-конфигурируемых сетей, их принцип работы, а также протоколы взаимодействия контроллера с сетевыми устройствами. Исследованы основные компоненты традиционных сетей, в том числе проведен сравнительный анализ временных задержек телекоммуникационного оборудования традиционных и программно-конфигурируемых сетей. Выделены 4

вида задержки в современных сетях передачи данных: задержка на обработку пакета, задержка пакета в очереди, задержка на передачу пакета по линии, задержка распространения. Рассмотрена работа алгоритма покрывающего дерева, выделены его основные достоинства и недостатки. Проведен сравнительный анализ традиционных и программно-конфигурируемых сетей связи, рассмотрены особенности построения корпоративных сетей на основе концепции SDN. Построена модель сети в эмуляторе Mininet, в которой проводилась аналитическая оценка временных задержек телекоммуникационного оборудования ПКС. В результате проведения эксперимента и сравнения полученных данных можно оценить два различных подхода к реакции сети на изменение топологии. Проведенный эксперимент показал, что традиционный подход к построению сетей уязвим к изменению топологии сети, что вносит определенные сетевые задержки и является причиной снижения производительности сети.

Ключевые слова: программно-конфигурируемые сети, маршрутизация, OpenFlow, Mininet, OpenDaylight

Для цитирования: Бужин И.Г., Антонова В.М., Миронов Ю.Б., Антонова В.А., Гайфутдинов Э.А. Сравнительный анализ временной задержки телекоммуникационного оборудования STP и SDN // Труды МАИ. 2022. № 125. DOI: [10.34759/trd-2022-125-13](https://doi.org/10.34759/trd-2022-125-13)

RADIO ENGINEERING AND COMMUNICATION

COMPARATIVE ANALYSIS OF THE TIME DELAY OF TELECOMMUNICATION EQUIPMENT STP AND SDN

Igor G. Buzhin^{1✉}, Veronika M. Antonova²,

Yuri B. Mironov³, Varvara A. Antonova⁴, Eldar A. Gaifutdinov⁵

^{1,3,4,5}Moscow technical university of communications and informatics,

Moscow, Russia

²Kotel'nikov institute of radio engineering and electronics of RAS, Moscow, Russia

¹i.g.buzhin@mtuci.ru✉

²xarti@mail.ru

³i.b.mironov@mtuci.ru

⁴varvara_zi@mail.ru

⁵e.a.gaifutdinov@mtuci.ru

Abstract. The article considers the architecture of software-defined networks, their principle of operation, as well as the protocols for the interaction of the controller with network devices. The main components of traditional networks are investigated, including a comparative analysis of the time delays of telecommunications equipment of traditional and software-defined networks. There are 4 types of delay in modern data transmission networks: packet processing delay, packet delay in the queue, packet transmission delay along the line, propagation delay. The operation of the spanning tree algorithm is considered, its main advantages and disadvantages are highlighted. A comparative analysis of traditional and software-defined communication networks is carried out, the features of building corporate networks based on the SDN concept are considered. A network model was built in the Mininet emulator, in which an analytical assessment of the time delays of the SDN telecommunications equipment was carried out. As a result of the experiment and comparison of the obtained data, two different approaches to the network response to

topology changes can be evaluated. The experiment showed that the traditional approach to building networks is vulnerable to changing the network topology, which introduces certain network delays and is the reason for the decrease in network performance.

Keywords: Software-Defined Networking (SDN), routing, OpenFlow, Mininet, OpenDaylight

For citation: Buzhin I.G., Antonova V.M., Mironov Yu.B., Antonova V.A., Gaifutdinov E.A. Comparative analysis of the time delay of telecommunication equipment STP and SDN, *Trudy MAI*, 2022, no.125. DOI: [10.34759/trd-2022-125-13](https://doi.org/10.34759/trd-2022-125-13)

Введение

На современном этапе развития сетей связи на телекоммуникационное оборудование транспортного и канального уровней накладывается ряд задач сеансового и прикладного уровней. Сложившаяся ситуация приводит либо к значительному повышению стоимости телекоммуникационного оборудования, либо к возникновению перегрузок и снижению качества предоставляемых услуг.

В связи с этим появилась необходимость вынесения уровня управления сетевым оборудованием на отдельное телекоммуникационное устройство, что является основой программно-конфигурируемых сетей (ПКС) [1].

В современных сетях связи, в том числе и в программно-конфигурируемых, предъявляются высокие требования к её способности удовлетворять потребности пользователей, которое определяется качеством обслуживания - набором характеристик, определяющих уровень удовлетворенности пользователя услуги

предоставленным ему сервисом. Одной из характеристик качества телекоммуникационных услуг является временная задержка, создаваемая телекоммуникационным оборудованием.

Таким образом, при проектировании программно-конфигурируемых сетей в условиях различного информационного воздействия (при различных входных информационных потоках) с заданным уровнем качеством обслуживания необходимо оценивать временные задержки в телекоммуникационном оборудовании. Также необходимо сравнить данный показатель на сегментах традиционных сетей и сетей связи с использованием ПКС.

Архитектура программно-конфигурируемых сетей

В соответствии с [2] программно-конфигурируемые сети (ПКС) представляют собой набор методов, которые позволяют программным способом управлять сетевыми ресурсами (например, коммутаторами и маршрутизаторами сети передачи данных) и контролировать их использование (загрузку), что упрощает решение задачи обеспечения эффективного использования пропускной способности транспортной сети и ее масштабирования, содействует снижению эксплуатационных затрат за счет централизации и автоматизации функций управления.

ПКС предусматривает наличие в сети контроллера ПКС, который предоставляет приложениям абстрактное представление сетевых ресурсов (коммутаторов и маршрутизаторов) и обеспечивает оркестрацию (координацию) управления сетевыми ресурсами (рис. 1).

При традиционном подходе построения сети обладают определенными недостатками. При использовании статистической маршрутизации на сети связи появляются следующие недостатки:

- Конфигурация и обслуживание телекоммуникационного оборудования отнимают много времени.
- Конфигурирование телекоммуникационного оборудования подвержена ошибкам, особенно в больших сетях.
- Вмешательство администратора требуется для
- Требуется полное знание целой сети для надлежащей реализации.

При использовании протоколов динамической маршрутизации выделяют два подхода для реализации – распределенный и централизованный. Централизованные динамические протоколы маршрутизации принимают решения о построении маршрутов на основе информации о топологии, но являются плохо масштабируемыми. Распределенным протоколам требуются временные задержки для синхронизации сетевых устройств и принятия единого решения.

Таким образом, при традиционных подходах к построению сетей в телекоммуникационном оборудовании реализованы уровни управления и передачи данных. За счёт этого снижается эффективность использования данных устройств, что приводит к снижению показателей качества обслуживания. Низкая эффективность сетевых устройств приводит к возрастанию количества сетевых устройств при проектировании сети, а также появляется необходимость индивидуальной настройки каждого сетевого устройства. В связи с этим возрастает

стоимость проектируемой сети, что является немаловажным фактором реализации данной сети.

Основная особенность архитектуры ПКС – разделение уровня передачи данных от уровня управления сетевым оборудованием. Помимо этого, ПКС реализует программно-управляемый интерфейс управления, позволяет разрабатывать и использовать различные сетевые приложения, в том числе с открытым исходным кодом, и bare metal устройства, что снижает зависимость от производителей телекоммуникационного оборудования.

Концепция ПКС предполагает использование абстракции потоков на уровне передачи данных, которые будут определяться на контроллере ПКС, что позволит направить вычислительные ресурсы сетевого оборудования на обработку и передачи трафика, что повышает производительность уровня передачи данных.

Основными компонентами программно-конфигурируемых сетей являются:

- коммутаторы ПКС – телекоммуникационные устройства, состоящие из таблиц адресаций потоков, групповой таблицы, а также каналов управления для соединения с внешним контроллером;
- контроллер ПКС – программное обеспечение, которое запускается на стандартном сервере с некоторой установленной операционной системой, которая управляет содержимым таблиц адресаций потоков и списков правил (действий) подчиненных ему коммутаторов ПКС. Изменение таблиц адресаций коммутаторов ПКС происходит на основе состояния сети и поступающих от коммутаторов ПКС пакетов по управляющему каналу;
- протокол управления коммутаторами ПКС;

- протокол администрирования сетевого оборудования;
- защищенный канал управления, по которому с помощью протокола управления коммутаторами ПКС осуществляется взаимодействие контроллера ПКС и коммутатора ПКС.

Под потоком будем понимать однонаправленный обмен данными между двумя пользователями (приложениями), который определяется IP-адресом источника, номером порта источника, IP-адресом назначения, номером порта назначения и номер транспортного протокола, который используется при передаче. Новым потоком считается поток, у которого один из пяти параметров не определен в коммутаторе ПКС.

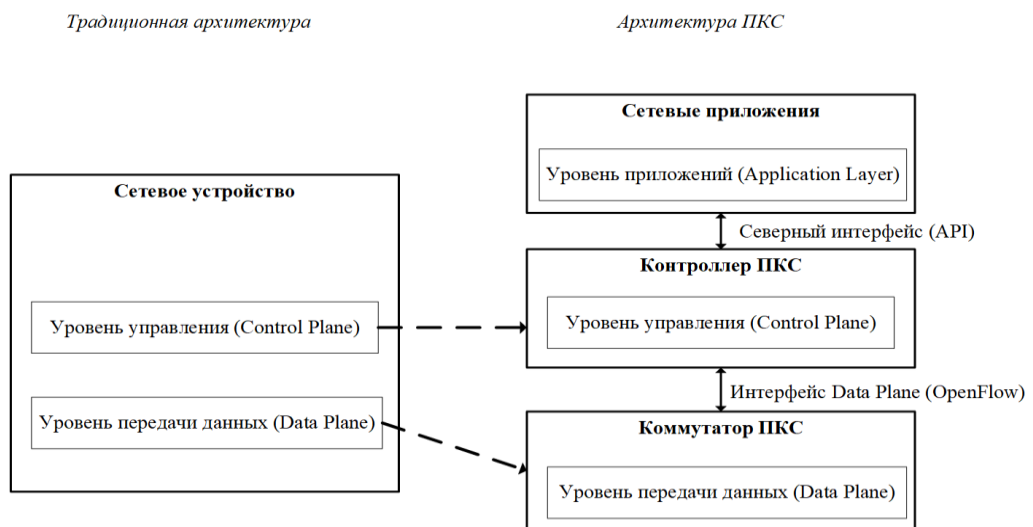


Рис. 1 – Архитектура программно-конфигурируемой сети

Все приведенные выше компоненты ПКС могут оказывать влияние на работоспособность сети. Таким образом, основными факторами, влияющими на работоспособность сетей связи на базе технологии ПКС являются:

- протоколы управления сетевыми устройствами. Такие протоколы ПКС, как OpenFlow, NETCONF, PCEP, OpFlex, OF-Config и другие позволяют конфигурировать и гибко управлять сетевыми устройствами;
- открытые программные интерфейсы: «южный» интерфейс (между уровнем управления и уровнем данных), «северный» интерфейс (между уровнем приложений и уровнем управления), «восточный» и «западный» интерфейсы в контуре управления, которые позволяют организовать распределенный контур управления;
- технология виртуализации сетевых функций (NFV). NFV виртуализирует сетевые сервисы, помогая быть аппаратно независимыми. Например, виртуализация позволяет развернуть виртуальную сеть из логических коммутаторов ПКС через общую аппаратную платформу.

В данной статье рассматривается влияние на качество сети связи такого фактора, как функционирование распределенного динамического протокола устранения петель в топологии произвольной сети. Для анализа влияния данного фактора необходимо рассмотреть более подробно функционирования телекоммуникационного оборудования ПКС.

Основы функционирования телекоммуникационного оборудования программно-конфигурируемых сетей

В коммутаторе ПКС реализован только уровень передачи данных. Коммутатор ПКС представляет собой сетевое устройство, состоящие из таблиц адресаций потоков, групповой таблицы, а также каналов управления для соединения с внешним контроллером. Пересылка информации внутри коммутатора ПКС основана на

потоках. Поток представляет собой последовательность пакетов между источником и пунктом назначения с одинаковыми политиками обслуживания.

За взаимодействие между контуром передачи данных и контуром управления отвечает протокол OpenFlow (OF). В протоколе OF предполагается, что коммутатор ПКС не только отвечает на запросы контроллера, но может передать контроллеру сообщения по своей инициативе, например, в случае изменения состояния порта или удаления некоторого правила через определенное время (Рис. 2).

Правила пересылки пакетов ПКС основана таблицах (Рис. 2), которая состоит из записей о потоках, содержащие шаблоны (список масок полей), приоритет, список инструкций (действие для потоков), таймер (максимальное время записи в таблице адресаций).

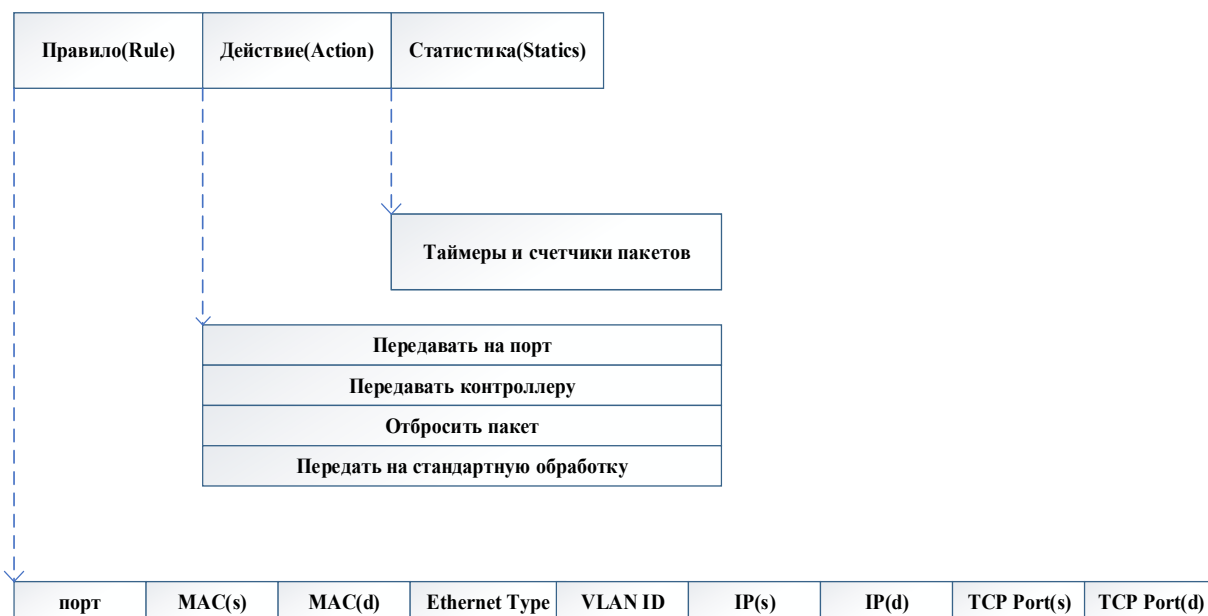


Рис. 2 - Структура таблицы адресации при использовании OF

Контроллер ПКС представляет собой сетевую операционную систему, которая реализует установление и поддержание соединений с коммутаторами ПКС, работу с очередью полученных сообщений и очередью сообщений на отправку в сеть, а также

интерфейс для различных приложений, реализующих управление сетью и работающих на контроллере. Контроллер во время работы коммутатора ПКС может вносить изменения в таблицы адресации, осуществлять перенастройку оборудования. Центральный контроллер имеет информацию о структуре и топологии сети. Это позволяет оптимизировать продвижение потоков данных.

Контроллер ПКС может быть представлен как аппаратно-программное оборудование, так и в качестве операционной системы. Данное устройство имеет информацию о структуре и топологии сети, становится возможным быстрое создание новых приложений и выполнение действий на уровне передачи данных в соответствии с конкретными требованиями качества обслуживания (рис. 3).

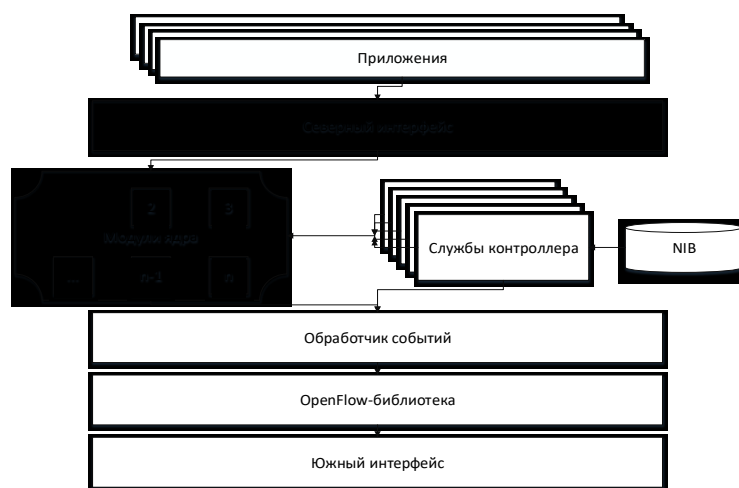


Рис. 3 - Обобщенная архитектура ПКС контроллера

ПКС-контроллер реализует базовые службы и интерфейс приложений для управления сетью и работающих на контроллере. Базовые службы обеспечивают приложениям контроллера работу с коммутаторами: вносить изменения в таблицы адресаций, определять механизмы работы с очередями и т.д. Службы контроллера позволяют вынести функциональность, используемую различными приложениями, в отдельные модули контроллера.

Сравнительный анализ временной задержки телекоммуникационного оборудования при традиционном подходе и ПКС

Одним из важных показателей качества обслуживания сети связи является общая временная задержка на передачу пакета, которая состоит из следующих компонент:

- Временная задержка на обработку информации о пакете – время между моментом поступления на вход сетевого устройства и моментом постановки в буфер данных.
- Время ожидания пакета в буфере данных.
- Временная задержка на передачу в линию связи – время между моментом поступления первого бита информации пакета в линию связи до момента поступления последнего бита информации пакета в линию связи.
- Время передачи пакета по линии связи – время между моментом поступления последнего бита информации пакета в линию связи на передатчике до момента поступления последнего на вход приемника.

При традиционном подходе построения сети для устранения петель в топологии произвольной сети и поиска резервных петель используют алгоритм STP [17]. В результате работы алгоритма гарантируется отсутствие петель в структуре сети и минимальное расстояние между узлами. Данный алгоритм является распределенным, что приводит к возрастанию времени нахождения резервных путей в сетях с большим количеством сетевого оборудования (время перехода на новую конфигурацию сети может составлять свыше 50 секунд).

В [2, 19, 20] была проведена аналитическая оценка временных задержек телекоммуникационного оборудования ПКС. Для проведения сравнительного анализа временных задержек телекоммуникационного оборудования было разработано 2 экспериментальных стенда (Рис. 4).

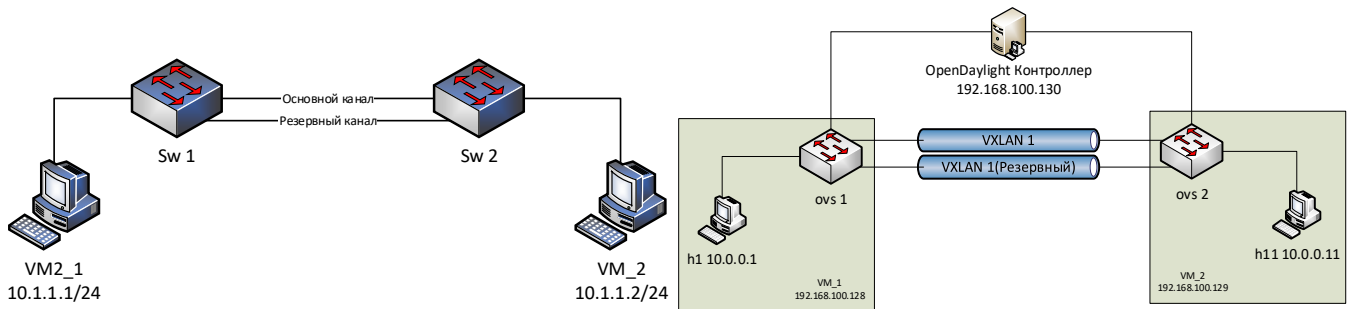


Рис. 4 - Схема экспериментальных стендов сегментов коммутуруемой традиционной сети и ПКС

В качестве активного сетевого оборудования было принято решение использовать сетевые устройства (коммутаторы L3) Cisco Catalyst 3750-24TS. Эти коммутаторы можно применять в качестве магистральных коммутаторов, собирающих трафик 10BASE-T, 100BASE-TX и 1000BASE-T от других сетевых устройств. Стенд сегмента ПКС построен на основе платформы Mininet, контроллера OpenDaylight и инструмента для генерации трафика D-ITG (Distributed Internet Traffic Generator). Во время генерации трафика на серверной части, на хосте h1 сегмента ПКС-сети был отключен порт туннеля VXLAN. Стенд перешел на резервный канал связи. После чего генерация трафика был приостановлена и были получены данные о задержке. Максимальная задержка доставки пакета составила 5,59 мс при потерях в 0% (до обрыва канала задержка варьировалась от 0.80 мс до 1.12 мс).

В результате проведения эксперимента можно сравнить полученные данные и провести оценку двух различных подходов к реакции сети на изменение топологии.

При моделировании ситуации обрыва канала связи и перехода на резервный, были получены следующие значения времени перехода сети на резервный канал (Таблицы 1 и 2):

Таблица 1 - Отключение порта

Технология	Переключение на основной канал
Традиционный подход	29 с
ПКС	4,79 мс.

Таблица 2 – Восстановление состояния порта

Технология	Переключение на резервный канал
Традиционный подход	27 с
ПКС	5,59 мс.

Проведенный эксперимент подтверждает, что традиционный подход к построению сетей уязвим к изменению топологии сети, что вносит определенные сетевые задержки и является причиной снижения производительности сети. В традиционных сетях это происходит за счет того, что в сетевых устройствах совмещены уровень управления и уровень сетевого взаимодействия. Сетевая задержка в таких сетях с большим количеством коммутаторов при внесении новой активной конфигурации может оказаться слишком большой, и как следствие, количество потерь может увеличиться, а время доставки пакетов возрастет. ПКС решает эту проблему за счет своего принципа построения сетей. Однако в ПКС линия связи между коммутатором и контроллером ПКС должна обладать как можно более высокой скоростью и иметь минимальное количество активного оборудования.

Заключение

В данной статье проведен сравнительный анализ временных задержек телекоммуникационного оборудования при традиционном подходе построения сети и с использованием технологии ПКС. Проведенный эксперимент показал, что традиционный подход к построению сетей уязвим к изменению топологии сети, что вносит определенные сетевые временные задержки и является причиной снижения производительности сети.

Список источников

1. ONF TR-502: SDN Architecture. URL: https://opennetworking.org/wp-content/uploads/2013/02/TR_SDN_ARCH_1.0_06062014.pdf
2. Samouylov K.E., Shalimov I.A., Buzhin I.G., Mironov Y.B. Model of functioning of telecommunication equipment for software-configured networks // Modern Information Technologies and IT-Education, 2018, vol. 14, no. 1. DOI:[10.25559/SITITO.14.201801.013-026](https://doi.org/10.25559/SITITO.14.201801.013-026)
3. Вишнеvский. В.М. Теоретические основы проектирования компьютерных сетей. – М.: Техносфера, 2003. – 512 с.
4. D-link. Gigabit Stackable Smart Managed Switches: Electronic text data. — D-link, 2015. URL: <https://www.dlink.com/en/products/dgs-1510-20-gigabit-stackable-smart-managed-switch-with-10g-uplinks>
5. HP Integrated Lights-Out 2. User Guide. URL: <http://h10032.www1.hp.com/ctg/Manual/c00553302.pdf>
6. OpenDaylight Controller: MD-SAL: FAQ. URL: https://docs.opendaylight.org/_/downloads/mdsal/en/latest/pdf/

7. ONF TR-539: OpenFlow Controller Benchmarking Methodologies, 2016. URL: https://opennetworking.org/wp-content/uploads/2014/10/TR-539_OpenFlow_Controller_Benchmarking_Methodologies_v1.pdf
8. Sherwood R., Chan M., Covington A., Gibb G., Flajslik M. et al. Carving research slices out of your production networks with OpenFlow // ACM SIGCOMM Computer Communication Review, 2010, vol. 40, no. 1, pp. 129–130. DOI:[10.1145/1672308.1672333](https://doi.org/10.1145/1672308.1672333)
9. Smeliansky R.L., Chemeritsky E.V. On QoS management in SDN by multipath routing // 2014 International Science and Technology Conference «Modern Networking Technologies (MoNeTec)», 2014. DOI:[10.1109/MoNeTeC.2014.6995581](https://doi.org/10.1109/MoNeTeC.2014.6995581)
10. Shalimov A., Zuikov D., Zimarina D. et al. Advanced study of sdn/openflow controllers // 9th Central and Eastern European Software Engineering Conference in Russia, CEE-SECR 2013, ACM International Conference Proceeding Series, Moscow, Russian Federation, 2013. DOI:[10.1145/2556610.2556621](https://doi.org/10.1145/2556610.2556621)
11. Vladyko A., Muthanna A., Kirichek R. Comprehensive SDN Testing Based on Model Network // Lecture Notes in Computer Science, 2016, vol. 9870, pp. 539–549. DOI:[10.1007/978-3-319-46301-8_45](https://doi.org/10.1007/978-3-319-46301-8_45)
12. ITU-T Y.3300: Framework of software-defined networking. URL: <https://www.itu.int/rec/T-REC-Y.3300/en>
13. Kreutz D., Ramos F.M.V., Verissimo P.E. et al. Software-Defined Networking: A Comprehensive Survey // Proceedings of the IEEE, 2014, vol. 103, issue 1, pp. 14-76. DOI:[10.1109/jproc.2014.2371999](https://doi.org/10.1109/jproc.2014.2371999)
14. Zhao Y. Iannone L., Riguidel M. On the Performance of SDN Controllers: A Reality Check // 2015 IEEE Conference on Network Function Virtualization and Software Defined

Network, November 18-21, 2015, San Francisco, USA. DOI: [10.1109/NFV-SDN.2015.7387410](https://doi.org/10.1109/NFV-SDN.2015.7387410)

15. ONF TS-006: OpenFlow Switch Specification version 1.3.0, 2012. URL: <https://opennetworking.org/wp-content/uploads/2014/10/openflow-spec-v1.3.0.pdf>

16. Gude N., Koponen T., Pettit J., Pfaff B. et al. NOX: towards an operating system for networks // SIGCOMM Computer Communication Review, 2008, vol. 38, no. 3, pp. 105–110.

17. Tsvetkov V.K., Oreshkin V.I., Buzhin I.G., Mironov Y.B. Model of Restoration of the Communication Network Using the Technology of Software Defined Networks // 2019 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (EIConRus) 2019, pp. 1559-1563. DOI: [10.1109/EIConRus.2019.8656723](https://doi.org/10.1109/EIConRus.2019.8656723).

18. Buzhin I.G., Mironov Y.B. Evaluation of delayed telecommunication equipment of Software Defined Networks // Systems of Signals Generating and Processing in the Field of on Board, SOSG 2019, 2019. DOI: [10.1109/SOSG.2019.8706825](https://doi.org/10.1109/SOSG.2019.8706825)

19. Волков А.С., Баскаков А.Е. Разработка процедуры двунаправленного поиска для решения задачи маршрутизации в транспортных программно-конфигурируемых сетях // Труды МАИ. 2021. № 118. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=158240>. DOI: [10.34759/trd-2021-118-07](https://doi.org/10.34759/trd-2021-118-07)

20. Бахтин А.А., Волков А.С., Солодков А.В., Баскаков А.Е. Разработка модели сегмента сети SDN для стандарта 5G // Труды МАИ. 2021. № 117. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=122307>. DOI: [10.34759/trd-2021-117-07](https://doi.org/10.34759/trd-2021-117-07)

21. Бородин В.В., Петраков А.М., Шевцов В.А. Моделирование служебного канала передачи маршрутной информации адаптивной летающей сети связи // Электросвязь. 2016. № 11. С. 41-45.

References

1. *ONF TR-502: SDN Architecture*. URL: https://opennetworking.org/wp-content/uploads/2013/02/TR_SDN_ARCH_1.0_06062014.pdf
2. Samouylov K.E., Shalimov I.A., Buzhin I.G., Mironov Y.B. Model of functioning of telecommunication equipment for software-configured networks, *Modern Information Technologies and IT-Education*, 2018, vol. 14, no. 1. DOI:10.25559/SITITO.14.201801.013-026
3. Vishnevskii. V.M. *Teoreticheskie osnovy proektirovaniya komp'yuternykh setei* (Theoretical foundations of computer network design), Moscow, Tekhnosfera, 2003, 512 p.
4. *D-link. Gigabit Stackable Smart Managed Switches: Electronic text data*. - D-link, 2015. URL: <https://www.dlink.com/en/products/dgs-1510-20-gigabit-stackable-smart-managed-switch-with-10g-uplinks>
5. *HP Integrated Lights-Out 2. User Guide*. URL: <http://h10032.www1.hp.com/ctg/Manual/c00553302.pdf>
6. *OpenDaylight Controller: MD-SAL: FAQ*. URL: https://docs.opendaylight.org/_downloads/mdsal/en/latest/pdf/
7. *ONF TR-539: OpenFlow Controller Benchmarking Methodologies*, 2016. URL: https://opennetworking.org/wp-content/uploads/2014/10/TR-539_OpenFlow_Controller_Benchmarking_Methodologies_v1.pdf

8. Sherwood R., Chan M., Covington A., Gibb G., Flajslik M. et al. Carving research slices out of your production networks with OpenFlow, *ACM SIGCOMM Computer Communication Review*, 2010, vol. 40, no. 1, pp. 129–130. DOI:[10.1145/1672308.1672333](https://doi.org/10.1145/1672308.1672333)
9. Smeliansky R.L., Chemeritsky E.V. On QoS management in SDN by multipath routing, *2014 International Science and Technology Conference «Modern Networking Technologies (MoNeTec)»*, 2014. DOI:[10.1109/MoNeTeC.2014.6995581](https://doi.org/10.1109/MoNeTeC.2014.6995581)
10. Shalimov A., Zuikov D., Zimarina D. et al. Advanced study of sdn/openflow controllers, *9th Central and Eastern European Software Engineering Conference in Russia, CEE-SECR 2013*, ACM International Conference Proceeding Series, Moscow, Russian Federation, 2013. DOI:[10.1145/2556610.2556621](https://doi.org/10.1145/2556610.2556621)
11. Vladyko A., Muthanna A., Kirichek R. Comprehensive SDN Testing Based on Model Network, *Lecture Notes in Computer Science*, 2016, vol. 9870, pp. 539–549. DOI:[10.1007/978-3-319-46301-8_45](https://doi.org/10.1007/978-3-319-46301-8_45)
12. ITU-T Y.3300: Framework of software-defined networking. URL: <https://www.itu.int/rec/T-REC-Y.3300/en>
13. Kreutz D., Ramos F.M.V., Verissimo P.E. et al. Software-Defined Networking: A Comprehensive Survey, *Proceedings of the IEEE*, 2014, vol. 103, issue 1, pp. 14-76. DOI: [10.1109/jproc.2014.2371999](https://doi.org/10.1109/jproc.2014.2371999)
14. Zhao Y. Iannone L., Riguidel M. On the Performance of SDN Controllers: A Reality Check, *2015 IEEE Conference on Network Function Virtualization and Software Defined Network*, November 18-21, 2015, San Francisco, USA. DOI: [10.1109/NFV-SDN.2015.7387410](https://doi.org/10.1109/NFV-SDN.2015.7387410)

15. *ONF TS-006: OpenFlow Switch Specification version 1.3.0*, 2012. URL: <https://opennetworking.org/wp-content/uploads/2014/10/openflow-spec-v1.3.0.pdf>
16. Gude N., Koponen T., Pettit J., Pfaff B. et al. NOX: towards an operating system for networks, *SIGCOMM Computer Communication Review*, 2008, vol. 38, no. 3, pp. 105–110.
17. Tsvetkov V.K., Oreshkin V.I., Buzhin I.G., Mironov Y.B. Model of Restoration of the Communication Network Using the Technology of Software Defined Networks, *2019 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering, (EIConRus)* 2019, pp. 1559-1563. DOI: 10.1109/EIConRus.2019.8656723.
18. Buzhin I.G., Mironov Y.B. Evaluation of delayed telecommunication equipment of Software Defined Networks, *Systems of Signals Generating and Processing in the Field of on Board*, SOSG 2019, 2019. DOI: [10.1109/SOSG.2019.8706825](https://doi.org/10.1109/SOSG.2019.8706825)
19. Volkov A.S., Baskakov A.E. *Trudy MAI*, 2021, no. 118. URL: <http://trudymai.ru/eng/published.php?ID=158240>. DOI: [10.34759/trd-2021-118-07](https://doi.org/10.34759/trd-2021-118-07)
20. Bakhtin A.A., Volkov A.S., Solodkov A.V., Baskakov A.E. *Trudy MAI*, 2021, no. 117. URL: <http://trudymai.ru/eng/published.php?ID=122307>. DOI: [10.34759/trd-2021-117-07](https://doi.org/10.34759/trd-2021-117-07)
21. Borodin V.V., Petrakov A.M., Shevtsov V.A. *Elektrosvyaz'*, 2016, no. 11, pp. 41-45.

Статья поступила в редакцию 02.06.2022

Статья после доработки 04.06.2022

Одобрена после рецензирования 10.07.2022

Принята к публикации 25.08.2022

The article was submitted on 02.06.2022; approved after reviewing on 10.07.2022; accepted for publication on 25.08.2022