

Современные радиотехнические и телекоммуникационные системы
Modern radio engineering and telecommunication systems

УДК 004.4:004.7

<https://doi.org/10.32362/2500-316X-2021-9-5-14-25>

ОБЗОР

Анализ и оценка эффективности методов обеспечения качества обслуживания программно-конфигурируемых сетей стандарта 5G/IMT-2020

Данешманд Бехруз Мехди [©]

Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101 Россия

[©] Автор для переписки, e-mail: daneshmandbehrooz@gmail.com

Резюме. Качество обслуживания в сети (QoS) – это процесс управления сетевыми ресурсами для уменьшения потери пакетов, а также уменьшения джиттера и задержки. QoS широко используется в традиционных сетях, а также может быть реализован в стандарте 5G на основе программно-конфигурируемой сети (SDN). Традиционная сеть несет в себе несколько проблем, таких как зависимость от поставщика, сложность управления большой сетью, динамически меняющиеся политики пересылки и многое другое. Программно-конфигурируемая сеть – это новая стратегия, разработанная для решения таких проблем традиционной IP-сети, как высокий уровень сложности и неспособность своевременно адаптироваться к новым требованиям к качеству обслуживания. Фундаментальная идея, лежащая в основе SDN, по сравнению с традиционной сетевой парадигмой, заключается в создании горизонтально интегрированных систем путем разделения уровня управления и данных при обеспечении все более сложного набора абстракций. В последнее время появились различные инфраструктуры QoS с поддержкой SDN, которые предлагают множество возможностей для реконфигурации сети и определения политик на высоком уровне. Требования QoS для сетей 5G были определены на основе трех основных категорий сценариев использования: Extreme Mobile BroadBand (xMBB), Massive Machine Type Communications (mMTC) IoT/M2M-устройства и высоконадежная M2M-связь (сверхнадежная связь машинного типа – uMTC). В статье анализируется и исследуется QoS на основе метода протокола OpenFlow и QoS на основе метода контроллеров с открытым исходным кодом SDN в сети 5G. Обсуждаются различные архитектурные проблемы сети SDN контроллеров с открытым исходным кодом и исследуется их влияние на QoS. Описываются характеристики QoS, такие как задержка, доступность, надежность, джиттер и пропускная способность. Обсуждаются и сравниваются параметры QoS в сети 5G, которые определены мировыми лидерами в данной технологии.

Ключевые слова: программно-конфигурируемая сеть, SDN, качество обслуживания, 5G/IMT-2020

• Поступила: 26.05.2021 • Доработана: 26.07.2021 • Принята к опубликованию: 28.07.2021

Для цитирования: Данешманд Бехруз Мехди. Анализ и оценка эффективности методов обеспечения качества обслуживания программно-конфигурируемых сетей стандарта 5G/IMT-2020. *Russ. Technol. J.* 2021;9(5):14–25. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2021-9-5-14-25>

Прозрачность финансовой деятельности: Автор не имеет финансовой заинтересованности в представленных материалах или методах.

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

REVIEW ARTICLE

Analysis and evaluation of the effectiveness of methods for ensuring the quality of service for software-defined networks of the standard 5G/IMT-2020

Behrooz Daneshmand [®]

ITMO University, St. Petersburg, 197101 Russia

[®] Corresponding author, e-mail: daneshmandbehrooz@gmail.com

Abstract. The quality of service (QoS) in networking is the process of managing network resources to reduce packet loss and to lower network jitter and latency. QoS has been widely used in traditional network and can also be implemented in the 5G standard based on a software-defined network (SDN). A traditional network carries several challenges, such as vendor dependency, the complexity of managing a large network, dynamically changing forwarding policies, and more. Software-defined networking is a new networking strategy designed to address the challenges of a traditional IP network, such as high levels of complexity and inability to adapt to the new quality of service requirements in a timely manner. The fundamental idea behind SDNs compared to the conventional networking paradigm is the creation of horizontally integrated systems through the separation of the control and the data plane while providing an increasingly sophisticated set of abstractions. Recently, various SDN-enabled QoS frameworks have emerged that offer many possibilities for network reconfiguration and high-level definition of policies. QoS requirements for 5G networks have been defined on the basis of three main categories of use cases: extreme mobile broadband (xMBB), massive machine type communications (mMTC) IoT/M2M devices, and highly reliable M2M-communication (ultra-reliable machine-type communications – uMTC). This paper analyzes and surveys the QoS based on the openflow protocol method and QoS based on open-source SDN controllers method in 5G network. In addition, we discuss various architectural issues of open-source SDN controllers network and examine their impact on the QoS. Furthermore, we outline the characteristics of the QoS parameters such as latency, availability, reliability, jitter, and bandwidth in the 5G network. Finally, the article discusses and compares parameters of the QoS in 5G determined by world's leaders in 5G technology.

Keywords: Software-Defined Network, SDN, Quality of Service, 5G/IMT-2020

• Submitted: 26.05.2021 • Revised: 26.07.2021 • Accepted: 28.07.2021

For citation: Behrooz Daneshmand. Analysis and evaluation of the effectiveness of methods for ensuring the quality of service for software-defined networks of the standard 5G/IMT-2020. *Russ. Technol. J.* 2021;9(5):14–25 (in Russ.). <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2021-9-5-14-25>

Financial disclosure: The author has no a financial or property interest in any material or method mentioned.

The author declares no conflicts of interest.

ВВЕДЕНИЕ

Глобальное влияние технологии 4G привело к увеличению использования мобильной связи и повышению производительности сетей. Внедрение технологии 5G позволит развивать этот импульс, обеспечивая существенное улучшение характеристик сетей, в том числе более высокие скорости соединения, мобильность и пропускную способность, а также возможности связи с малой задержкой. Тем самым она открывает новые варианты использования и представляет перспективные приложения, которые могут

положительно повлиять на развитие различных отраслей промышленности. Сети 5G могут создавать экосистему для технических и бизнес-инноваций, включая такие вертикальные рынки, как автомобилестроение, здравоохранение, производство, энергетика, продовольствие и сельское хозяйство, управление городами, правительство, общественный транспорт, СМИ и многое другое. Они предлагают неограниченный мобильный широкополосный доступ, обеспечивают широкие возможности подключения для всего – от управляемых человеком интеллектуальных устройств до датчиков и машин, и, что наиболее

важно, имеют возможность поддерживать критически важные машинные коммуникации с мгновенным действием и сверхвысокой надежностью [1].

Технологии мобильной связи 5G впервые появились в Южной Корее в 2020 году, а затем – в Китае, США и Европейском союзе. К 2025 году ожидается, что в мире будут миллионы подключений 5G. Интернет пятого поколения будет в 5 раз быстрее, чем нынешние системы четвертого поколения (с задержкой в 25 раз меньше), и будет поддерживать до одного миллиона устройств на квадратный километр. Основу Интернета 5G можно резюмировать в следующих пяти технологиях: миллиметровые волны, небольшие сотовые сети, MIMO (несколько входов и выходов), формирование луча и двухсторонние байты. Традиционная сеть несет в себе несколько проблем, таких как зависимость от поставщиков, сложность управления большой сетью, динамическое изменение политик пересылки и многое другое. Что еще более важно, традиционная IP-сеть неспособна своевременно реагировать на изменения и вновь возникшие требования QoS. Такие сбои в основном вызваны характером традиционных IP-сетей, в которых плоскость управления и плоскость данных вертикально связаны друг с другом и реализованы в сетевых устройствах. Чтобы преодолеть проблемы существующей традиционной сети, появилась концепция программируемой сети [2, 3].

Ее поведение контролируется программным обеспечением, называемым программно-определяемой сетью (SDN). Эта сеть представляет собой динамически развивающуюся инфраструктуру, которая отдельно управляет плоскостью данных и плоскостью

управления, в отличие от обычных сетей [2]. Плоскость управления логически разделена и централизована, в то время как плоскость передачи данных следует решению плоскости управления. На основе Open Networking Foundation (ONF) [4] SDN имеет три уровня, а именно: уровень инфраструктуры, уровень управления и уровень приложений [5]. Архитектура SDN показана на рис. 1 и поясняется ниже [4].

- **Уровень инфраструктуры** в основном состоит из элементов пересылки (например, физических и виртуальных коммутаторов, маршрутизаторов, точек беспроводного доступа), которые составляют плоскость данных.
- **Уровень управления**, также известный как плоскость управления (это сердце архитектуры SDN), поддерживает связь между уровнем приложений и уровнем инфраструктуры через открытые интерфейсы.
- **Уровень приложения** разработан в основном для удовлетворения требований пользователей. Он состоит из бизнес-приложений конечных пользователей, которые используют сетевые сервисы.

Протокол OpenFlow, поддерживаемый ONF, является фундаментальным элементом для разработки решений SDN. OpenFlow, первый из ведущих авторизованных коммуникационных интерфейсов, связывающий уровни пересылки и управления в архитектуре SDN, позволяет управлять уровнем пересылки сетевых устройств (например, коммутаторами и маршрутизаторами) и управлять им как физически, так и виртуально. Он помогает архитектуре SDN адаптироваться к высокой пропускной способности, динамическому характеру пользовательских

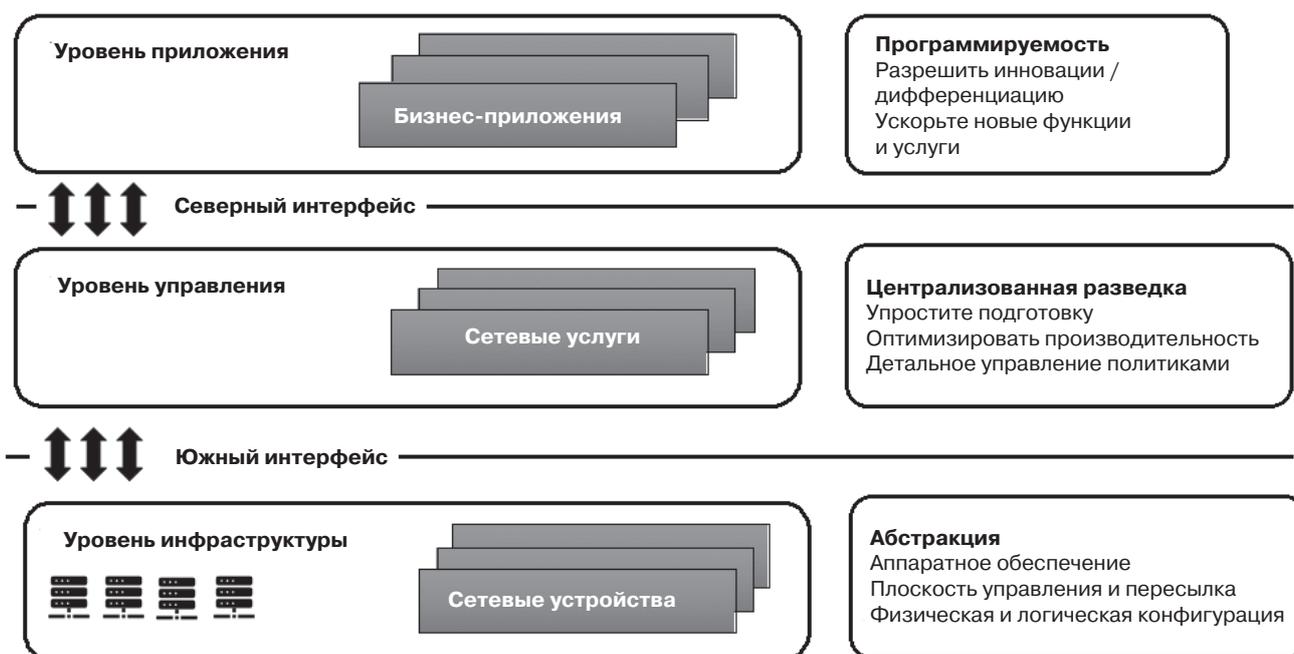


Рис. 1. Уровни и функции SDN

приложений, настраивать сеть в соответствии с различными бизнес-потребностями и, что интересно, уменьшать сложность управления и обслуживания.

В сетях 5G на SDN на основе QoS влияют многие факторы, поэтому далее обсудим параметры QoS, которые определяют мировые лидеры технологий 5G применительно к таким сетям. Будут представлены уровни высокого качества обслуживания в контексте следующих характеристик: повышение скорости, емкости мобильных сетей и рост количества беспроводных устройств.

В разделе 1 дается краткий обзор архитектуры OpenFlow, а затем рассматриваются два метода QoS, основанные на протоколе OpenFlow и контроллерах с открытым исходным кодом SDN. В разделе 2 обсуждаются архитектурные проблемы в SDN и их влияние на QoS. В разделе 3 приведены ключевые показатели эффективности (KPI), параметры QoS и их влияние в сети 5G. В разделе 4 проанализированы и сведены в таблицу параметры QoS для следующего поколения 5G.

1. QOS В ПРОТОКОЛЕ OPENFLOW И КОНТРОЛЛЕРАХ SDN С ОТКРЫТЫМ ИСХОДНЫМ КОДОМ

А. Архитектура OpenFlow и QoS на основе протокола OpenFlow

Архитектура OpenFlow [6] – это предложение инициативы Clean Slate по определению открытого протокола, который устанавливает таблицы пересылки в коммутаторах, это основа архитектуры SDN, в которой пользователь может изменять сеть.

Протокол OpenFlow – это, по сути, интерфейс связи между контроллерами и плоскостями пересылки OpenFlow (уровень инфраструктуры) [7]; это первый стандартный протокол связи для сред SDN. OpenFlow предоставляет путь маршрута потока для пересылки пакетов по программируемым сетям. Ключевое преимущество этого протокола в том, что он позволяет настраивать коммутаторы различных производителей с помощью контроллеров. В средах SDN доступны разные версии OpenFlow.

Архитектура OpenFlow дает несколько преимуществ:

1. централизованные контроллеры OpenFlow могут управлять всеми решениями потока, снижая сложность коммутатора;
2. центральный контроллер может видеть все сети и потоки, обеспечивая глобальное и оптимальное управление инициализацией сети;
3. коммутаторы OpenFlow относительно просты и надежны, поскольку прямые решения определяются контроллером, а не микропрограммой коммутатора.

Однако OpenFlow объединяет две характеристики: уникальный контроллер и простые устройства, что приводит к проблемам масштабируемости.

В сети SDN с коммутаторами и поддержкой OpenFlow коммутатор состоит из трех основных частей. На рис. 2 показаны компоненты архитектуры OpenFlow:

- *таблицы потоков* с действием, связанным с каждой записью потока, чтобы сообщить коммутатору, как обрабатывать поток.
- *защищенный канал*, который соединяет коммутатор с процессом удаленного управления (называемым контроллером), позволяя передавать команды и пакеты между контроллером и коммутатором.
- *протокол OpenFlow*, который обеспечивает открытый и стандартный способ связи контроллера с коммутатором.

Используя протокол OpenFlow, коммутатор OpenFlow становится простым элементом пути данных, который пересылает пакеты между портами таким образом, как это определено процессом удаленного управления.

По мере увеличения количества коммутаторов OpenFlow использование одного контроллера для всей сети может оказаться невозможным по нескольким причинам:

1. количество управляющих сообщений, адресованных централизованному контроллеру, растет с количеством коммутаторов;
2. с увеличением диаметра сети у некоторых коммутаторов будет более длительная задержка срабатывания, независимо от того, где находится контроллер [6];
3. поскольку система ограничена мощностью процессора контроллера, время настройки может значительно увеличиться при увеличении количества коммутаторов и размера сети.

В сети SDN контроллер может работать в трех рабочих режимах для установки нового правила потока: реактивный режим (Reactive mode), проактивный режим (Proactive mode) и гибридный режим (Hybrid mode) [9].

Реактивный режим. В реактивном режиме, когда новый пакет поступает на сетевое устройство (например, коммутатор), коммутатор выполняет поиск правил потока в своих таблицах потоков. Если совпадения с потоком не найдено, коммутатор пересылает его контроллеру, используя C-DPI, чтобы контроллер решил, как обрабатывать пакет. После того, как контроллер обработает пакет в соответствии с сетевыми политиками, он создает и отправляет запись потока для установки на сетевом устройстве. Будущие потоки, соответствующие этой записи потока на основе атрибутов заголовка пакета, будут обрабатываться согласно соответствующему правилу сопоставления.

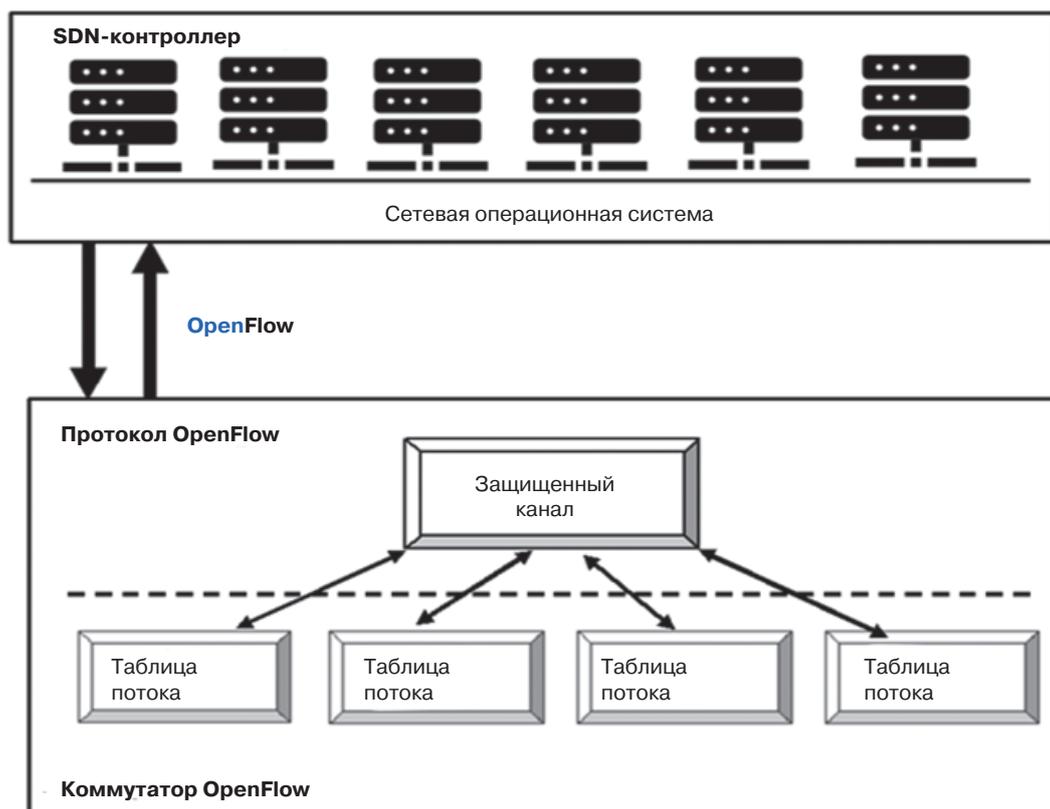


Рис. 2. Архитектура OpenFlow [8]

Проактивный режим. В проактивном режиме записи потоков настраиваются в таблицах потоков коммутаторов до того, как на коммутаторы поступят новые потоки. Когда пакет поступает на коммутатор, коммутатор уже «знает», как поступить с этим пакетом. В этом случае контроллер не участвует ни в каком процессе настройки правил потока.

Гибридный режим. В гибридном режиме контроллер использует преимущества как реактивного, так и проактивного режимов. Вполне возможно, что сетевые администраторы заранее устанавливают определенные записи потока в устройства плоскости данных, а контроллер(ы) реактивно изменяют (удаляют/обновляют) их или даже добавляют новые записи потока на основе входящего трафика.

В то время, как проактивный режим вызывает некоторые опасения по поводу неэффективного использования памяти коммутатора, реактивный режим обеспечивает более гибкую и динамичную среду как для контроллеров, так и для коммутаторов.

В. QoS на базе контроллеров SDN с открытым исходным кодом

Производительность контроллера – центральный вопрос архитектуры OpenFlow. Контроллер может поддерживать ограниченное количество настроек потока в секунду. Программно-определяемые

сети используют два типа контроллеров: централизованные и распределенные. Табл. 1 описывает классификацию различных контроллеров по двум категориям [10, 11].

Параметры качества обслуживания в контроллерах с открытым исходным кодом включают следующие показатели: надежность, масштабируемость, последовательность, балансировка нагрузки.

2. АРХИТЕКТУРНЫЕ ПРОБЛЕМЫ В SDN И ИХ ВЛИЯНИЕ НА КАЧЕСТВО ОБСЛУЖИВАНИЯ

2.1. Централизованное администрирование

В среде SDN коммутатор разделен контроллерами и переключателями дампа. Более того, все контроллеры и переключатели в сетях активны для большой сети. Конструкция контроллеров и размещение различных контроллеров остаются предметами исследования с целью улучшения производительности сети. Другие факторы, такие как гибкость, масштабируемость, задержка, безопасность и совместимость, также важны для повышения производительности сети [7, 12, 13].

Для балансировки нагрузки трафика и достижения хорошего качества обслуживания в крупномасштабных сетях SDN развернуты несколько контроллеров [14]. По мере увеличения количества контроллеров концепция централизованного

Таблица 1. Классификация контроллеров SDN

Типы контроллеров			
Централизованные		Распределенные	
Централизованные контроллеры реализуют всю логику плоскости управления в одном месте. В таком контроллере единственный сервер берет на себя все действия на уровне управления. Основное преимущество таких контроллеров – простота и управляемость, поскольку они обеспечивают единую точку управления. Однако они страдают от проблемы масштабируемости, поскольку каждый сервер имеет ограниченную емкость для работы с устройствами плоскости данных. Поддержка QoS в сети SDN стала возможной благодаря компоненту централизованного логического контроллера SDN		Распределенный контроллер не имеет проблем с масштабируемостью и имеет преимущество высокой производительности при высокой нагрузке трафика	
Контроллеры	Язык программирования	Контроллеры	Язык программирования
<ul style="list-style-type: none"> • NOX • POX • RYU • Beacon • Maestro • FloodLight • OpenDaylight • Meridian 	<ul style="list-style-type: none"> • Python • Python • Python • Java • Java • Java • Java • Java 	<ul style="list-style-type: none"> • ONOS • Runos • Hyperflow • Onix • SMaRtLight • OpenMUL 	<ul style="list-style-type: none"> • Java • C++ • C++ • C, Python • Java • C

управления меняется. У разных контроллеров могут быть разные функции, поэтому их централизованное администрирование затруднительно [13].

2.2. Масштабируемость сети

Благодаря наличию нескольких программных контроллеров сеть легко масштабируется. Но масштабируемость может быть поставлена под сомнение QoS из-за балансировки нагрузки между контроллерами [13, 14].

2.3. Несогласованность между контроллерами

Из-за того, что в программируемой сети реализовано несколько контроллеров, основная проблема заключается в синхронизации информации о состоянии сети в SDN с ними. Эта проблема известна как проблема консенсуса [13]. Из-за сложной реализации и возрастающей задержки консенсусные подходы не подходят. При проектировании нескольких контроллеров важно обеспечить согласованность между ними.

2.4. Размещение контроллера

Использование только одного контроллера в программно-определяемой сети имеет много преимуществ, таких как централизованное управление, контроль и мониторинг всей сетевой среды с помощью одного узла. Но в то же время такой подход влечет за собой проблемы надежности и масштабируемости [13]. По мере роста сети эти проблемы ухудшаются

производительность. Проблема размещения контроллеров известна с 2012 года. Чтобы уменьшить задержку служебных данных и повысить общую производительность, необходимо размещать оптимальное количество контроллеров на надлежащем расстоянии в сети [15]. В крупномасштабных сетях при развертывании контроллеров рассматриваются два важных вопроса: сколько контроллеров необходимо в сетях и где эти контроллеры установлены в сетях. Хотя это недетерминированные полиномиально сложные задачи, их необходимо решить для развертывания нескольких контроллеров [13].

2.5. Протокол связи контроллера

В распределенной среде требуется несколько контроллеров, и они напрямую влияют на QoS сети SDN. В связи с этим требуется эффективный обмен данными между контроллерами. Для связи контроллеров требуется интерфейс «восток-запад», и в сети SDN должен быть разработан стандартный протокол такой связи. В настоящее время глобальная сеть поддерживает протокол пограничного шлюза (BGP – Border Gateway Protocol) для интерфейсов «восток-запад» [12].

2.6. Планирование нескольких контроллеров

QoS может быть лучше за счет использования нескольких контроллеров, но необходимо планировать нагрузку разных контроллеров, чтобы избежать их перегрузки. Главная проблема в этом случае – как быстро уравновесить перегрузку.

3. АНАЛИЗ QOS В РАЗЛИЧНЫХ КОНТРОЛЛЕРАХ SDN

Существует множество открытых, а также доступны коммерческие контроллеры SDN. Различные функции платформ контроллеров подходят для разных приложений. Для примера три контроллера SDN описаны в табл. 2

Помимо QoS в контроллерах, на индекс QoS влияют параметры программирования, включая QoS в протоколе OpenFlow. Каждая новая версия спецификации OpenFlow содержит некоторые функции с незначительными и значительными изменениями по сравнению с предыдущими, поэтому QoS варьируется в разных версиях.

4. ОТ KPI К QOS В СЕТИ 5G/IMT-2020

Сеть пятого поколения (5G/IMT-2020) – это последняя итерация сотовой технологии, разработанная для значительного увеличения скорости и отзывчивости беспроводных сетей. Согласно [19] технологическими целями 5G являются следующие показатели: в 1000 раз больший мобильный трафик, от 10 до 100 раз более высокая скорость передачи для пользователей, от 10 до 100 раз больше пользователей, в 10 раз более длительное время автономной работы при массовых коммуникациях M2M, 5-кратное сокращение E2E (End-to-End) задержки.

Концепция 5G состоит из трех общих услуг:

Таблица 2. Примеры контроллеров SDN

Контроллер	Описание
OpenDaylight	OpenDaylight (ODL) – это открытая модульная платформа для настройки и автоматизации сетей любого размера и масштаба. Проект OpenDaylight возник из движения SDN с четким акцентом на программируемость сети. ODL проекта включает поддержку всех платформ SDN, в т.ч. OpenFlow, Open VSwitch (OVS) Database (OVSDDB), NETCONF, SNMP, BGP и приложения (например, DDoS Координатор защиты и виртуализации), дополняя друг друга, составляя полную платформу эталонного контроллера для гетерогенных сетей. Контроллер OpenDaylight предоставляет открытые северные API-интерфейсы, которые используются приложениями. Эти приложения используют контроллер для сбора информации о сети, запускают алгоритмы для проведения аналитики, а затем используют контроллер OpenDaylight для создания новых правил во всей сети. PacketNet MultiMedia (PCMM), представленный в ODL-Lithium, предоставляет интерфейс для управления и поток службы управления для сетевых элементов CMTS. Потоки услуг составляют тракт данных DOCSIS между CMTS и кабельным модемом абонента (CM) с гарантированным качеством обслуживания (QoS), зависящим от приложения, известным как динамическое качество обслуживания (DQoS). PCMM предлагает (MSO) возможность предоставлять новые услуги с использованием существующей кабельной инфраструктуры. Кроме того, OVSDDB – еще один «южный» протокол для управления и настройки очередей в коммутаторах и виртуальных коммутаторах. Это еще одно дополнение к модулю резервирования ODL, которое направлено на обеспечение резервирования ресурсов низкого уровня, предоставляющее пользователям возможность подключения к сети, пропускную способность и порты в течение определенного отведенного времени [2, 9, 16]
ONOS	Контроллер ONOS (открытая сетевая операционная система) – это операционная система (ОС), разработанная, чтобы помочь поставщикам сетевых услуг создавать программно-определяемые сети операторского уровня, спроектированные для обеспечения высокой масштабируемости, доступности и производительности. Среди поставщиков услуг, участвующих в инициативе ONOS – AT&T, NTT Communications и SK Telecom. Поставщики, вносящие свой вклад в ONOS, включают Cisco, Ericsson, Intel, NEC, Ciena и Huawei. Партнеры ON.Lab и ONOS обнаружили несколько вариантов использования операционной системы. ONOS поддерживает механизм OpenFlow, и, соответственно, существующие коммутаторы редко реализуют ONOS. Таким образом, платформа ONOS обеспечивает ограниченные QoS, поскольку эта реализация поддерживает функциональные возможности OpenFlow set_queue. Для улучшения QoS библиотеки ONOS реализовали функцию Set Queue Instruction, а именно инструкцию верхнего уровня [2, 9, 17]
Floodlight	Floodlight Controller (на основе Java) – это контроллер SDN, созданный открытым сообществом разработчиков, многие из которых представляют Big Switch Networks, который использует протокол OpenFlow для управления потоками трафика в среде программно-определяемых сетей (SDN). Контроллер Floodlight реализует модуль QoS, который обеспечивает такие функции, как удаление потока, вставка потока и некоторые политики для обработки QoS. Эти модули реализованы в OpenFlow версии 1.0. Когда дело доходит до OpenFlow, качество обслуживания находится на начальной стадии. OpenFlow 1.0 модуль пытается дать пользователю возможность просто установить состояние QoS на коммутаторы, поддерживающие эти функции. Эти модули будут нацелены на устранение действий «постановка в очередь» и «установка без очереди». API статического толкателя потока (flow pusher) называет это «установленными битами». Спрес включает способы, с помощью которых можно установить сетевой тип службы для потока, а также поставить пакеты, соответствующие потоку, в определенную очередь на определенном порту. В интерфейсе Floodlight Northbound модуль QueuePusher генерирует сообщения для конфигураций очереди для функций создания, чтения, обновления и удаления для управления открытыми vSwitches [18]

1. eMBB (расширенная мобильная широкополосная связь). Для этого требуется большая емкость, высокая скорость и динамическое распределение полосы пропускания. Хотя высокая скорость помогает загружать и скачивать видео-контент быстрее в гигабайтных размерах, пропускная способность может быть выделена по запросу для видео сверхвысокой четкости (UHD), виртуальной реальности, дополненной реальности и т.д.

2. uRLLC (сверхнадежная связь с малой задержкой). Эти услуги требуют высокой надежности, высокой доступности и малой задержки. Высокая надежность поддерживает критически важные услуги, такие как подключенные роботизированные заводы и удаленная хирургия, в то время как малая задержка делает реальностью услуги, такие как автономные автомобили и дистанционно управляемые дроны.

3. mMTC (массовая связь машинного типа). Этот класс услуг характеризуется высокой пропускной способностью, высокой скоростью и динамическим распределением пропускной способности и лучше всего подходит для услуг Интернета вещей (IoT), таких как умные города, обслуживающих миллиарды «вещей» и «устройств» с плотностью до одного миллиона на квадратный километр [27].

Эти три общие услуги следует рассматривать как базовые характеристики, охватывающие сценарии пользователей 5G. Ключевые показатели эффективности (КПЭ/КРІ), которые с точки зрения конечного пользователя используются в качестве основы для оценки эффективности конкретных сценариев, приведены в табл. 3.

Большинство популярных на сегодняшний день приложений и сценариев использования будут продолжены в рамках 5G, в дальнейшем будут применяться КПЭ/КРІ и QoS.

Ключевые показатели эффективности для технологии 5G показаны на рис. 3 [20]:

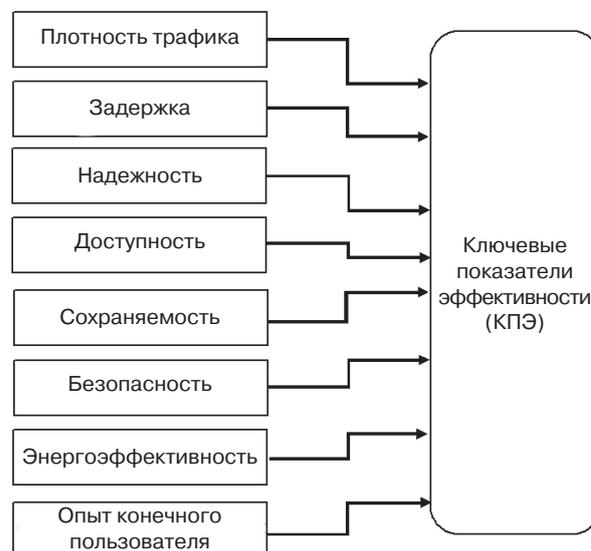


Рис. 3. КПЭ/КРІ для технологии 5G/IMT-2020

Новые технологии, называемые в данной статье «ключевыми инструментами реализации технологий (Key Technology Enablers – KTEs) 5G», играют главную роль в обеспечении QoS в 5G, и одного SDN здесь недостаточно. Чтобы достичь амбициозных значений QoS, необходимо влиять на все технологии KTEs, указанные ниже:

1. Спектр и массивный MIMO (многоканальный вход – многоканальный выход).

Таблица 3. Характеристики производительности 5G, необходимые для каждого сценария использования МСЭ¹

eMBB	uRLLC	mMTC
Пиковая скорость передачи данных: от 10 до 20 Гбит/с; минимальная скорость передачи данных: 100 Мбит/с	Обеспечивает сверхчувствительные соединения	Поддерживает высокую плотность устройств (10 ⁶ на км ²)
Увеличивает пропускную способность в 100 раз	Обеспечивает задержку радиointерфейса менее 1 мс	Поддерживает большие расстояния и низкую скорость передачи данных (1–100 кбит/с)
Поддерживает макро- и маленькие ячейки	Сверхнадежный и доступный с «пятью девятками» (99.999% времени)	Использует преимущества сверхнизкой стоимости M2M
Поддерживает высокую мобильность около 500 км/ч	Обеспечивает скорость передачи данных от низкой до средней (50–10 Мбит/с)	Обеспечивает срок службы батареи до 10 лет для Интернета вещей
Повышает экономию сетевой энергии в 100 раз	Обеспечивает высокую скорость передвижения	Обеспечивает асинхронный доступ

¹ Международный союз электросвязи



Рис. 4. Новые концепции, средства реализации и требования QoS пятого поколения (5G).

* Повышенная экономическая эффективность

2. Виртуализация сетевых функций (NFV).
3. Централизованный радиодоступ (C-RAN).
4. Локальная разгрузка (Local offloading).
5. Малые соты (Small Cells).
6. Программно-конфигурируемая сеть (SDN).

На рис. 4 показаны факторы, на которые опирается каждая концепция, и удовлетворению которых способствует выполнение требований QoS.

Каждый из инструментов КТЕ¹ создает новую концепцию в 5G, которая напрямую влияет на показатели КПЭ/КРІ и, следовательно, влияет на QoS 5G. К новым концепциям относятся:

1. Цепочка сервисов.
2. Новая архитектура.
3. Новые радиointерфейсы.
4. Нарезка сети.
5. Распределение и размещение сетевых функций.
6. Гибкий контроль.

5. QOS ДЛЯ СЛЕДУЮЩЕГО ПОКОЛЕНИЯ СЕТИ 5G

Технология 5G должна значительно улучшить качество услуг с точки зрения объема сетевых данных и типов услуг. В настоящее время во всем мире предпринимаются огромные усилия по определению новой архитектуры 5G с такими инициативами, как государственно-частное партнерство инфраструктуры 5G (5G-PPP) и проект METIS в Европе [21]; IMT-2020 (5G) в России [22]; 5G Америка в Америке [23]; IMT-2020 (5G) PG3 в Китае [24]; Форум 5G в Корее [25, 26] и Пятый Форум по продвижению мобильной связи поколения (5GMF) в Японии [26]. Обещанные значения параметров QoS 5G указаны в табл. 3 [28].

В табл. 4 показаны параметры QoS по основным движущим принципам технологии 5G.

В рамках проекта METIS определены 12 сценариев использования сетей 5G [19]. В тесте сценария

¹ key technology enablers

использования «Офис виртуальной реальности» конечные пользователи должны иметь возможность получить скорость передачи данных не менее 5 Гбит/с в 20% офисных помещений, например, на реальных столах в 99% часов наибольшей нагрузки. Во всех упомянутых выше инициативах задержка между устройствами (D2D) составляет менее 5 мс. Наивысшие требования к доступности и надежности сети 5G составляют 100% и 99.999%, соответственно, для всех инициатив.

Энергопотребление, как видно из таблицы, является важным параметром в технологии 5G. Этот параметр от 10 до 100 раз лучше по сравнению с предыдущим поколением сетей. Еще один параметр, влияющий на качество обслуживания – это соотношение пакетов, потерянных из-за ошибок при приеме пакетов данных IP Packet Error Loss Rate (PELR). Требования к скорости потери пакетов при видеотрансляции в сетях 5G составляет 10^{-9} . Для сервисов M2M качество также будет определяться долей пакетов, потерянных при приеме. Требование к PELR для услуги M2M с гарантированным качеством обслуживания в сетях 5G составляет 10^{-7} . Другим важным параметром, определяющим потребности QoS в сети пятого поколения, является общий бюджет задержки пакетов (PDB), который

Таблица 3. Обещанные значения параметров QoS 5G

Скорость	10 Гбит/с / цель до 20 Гбит/с
Сквозная задержка	1–10 мс
Доступность сети	100% везде
Надежность	Коэффициент ошибок BER: 0.00001 за период в 1 мс
Джиттер	10–100 мкс
Пропускная способность	От 100 кбит/с до нескольких сотен Мбит/с

Таблица 4. Параметры QoS по основным движущим принципам технологии 5G

QoS	5G-PPP/ METIS	5G Americas	IMT-2020 (5G) PG	5G Forum
Пропускная способность для пользователей	зависит от теста варианта использования ¹	зависит от теста варианта использования	зависит от теста варианта использования	зависит от теста варианта использования
Задержка	5 мс (E2E)	в 5–100 раз лучше	1 мс (E2E)	1 мс (E2E)
Доступность	≈100%	≈100%	≈100%	≈100%
Потребление энергии	в 10 раз лучше	–	в 100 раз лучше	в 1000 раз лучше
Надежность	«пять девяток» 99.999%	высокая	«пять девяток» 99.999%	гипервысокая

¹ От офиса виртуальной реальности, города с плотной застройкой, торгового центра, стадиона и т.д. 5 Гбит/с в нисходящем и восходящем каналах.

формируется на радиоинтерфейсе RAN и рассматривается как максимальная задержка пакета с уровнем управления 98%.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Появление и внедрение технологии 5G базируется на значительном улучшении ключевых показателей в мобильных сетях, включая сквозное качество обслуживания QoS. Программно-конфигурируемая сеть SDN – это привлекательная область исследований для сетевых коммуникаций, а также неотъемлемая часть сети 5G. SDN обещает предоставить мощный способ реализации концепции сквозного качества обслуживания QoS в современных сетях связи.

В технологии 5G удовлетворение требований клиентов ставит перед оператором множество новых задач. Надежность и масштабируемость – ключевые проблемы QoS в программируемой сети. В статье проанализирован метод QoS на основе протокола OpenFlow и метод QoS на основе контроллеров с открытым исходным кодом SDN в сети. Исследованы архитектурные проблемы на основе SDN и их влияние на параметры QoS, а также представлен обзор ключевых показателей эффективности в сетях 5G/IMT-2020. Дополнительно проанализированы и другие параметры для улучшения QoS в сети следующего поколения: пропускная способность, задержка, джиттер и потери.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. View on 5G Architecture – 5G-PPP. Version 3.0. URL: https://5g-ppp.eu/wp-content/uploads/2019/07/5G-PPP-5G-Architecture-White-Paper_v3.0_PublicConsultation.pdf
2. Keshari S.K., Kansal V., Kumar S. A systematic review of quality of services (QoS) in software defined networking (SDN). *Wireless Personal Communications*. 2021;116(3): 2593–2614. <https://doi.org/10.1007/s11277-020-07812-2>
3. Moravejosharieh A.H., Lloret J. Performance analysis of quality of service in software-defined networking. *Network Protocols and Algorithms*. 2019;10(4):1. <https://doi.org/10.5296/npa.v10i4.14054>
4. Nam Tuan Le, Arif Hossain M., Islam A., Do-yun Kim, Young-June Choi, Yeong Min Jang. Survey of promising technologies for 5G networks. *Mobile Information Systems*. 2016; Article ID 2676589. <https://doi.org/10.1155/2016/2676589>
5. OpenFlow. OpenFlow Switch Specification. Version 1.5.0. 2014. URL: <https://opennetworking.org/wp-content/uploads/2014/10/openflow-switch-v1.5.0.pdf>
6. Fernandez M.P. Comparing openflow controller paradigms scalability: reactive and proactive. In: *Proc. IEEE 27th International Conference on Advanced Information Networking and Applications (AINA)*. 2013, p. 1009–1016. <https://doi.org/10.1109/AINA.2013.113>

REFERENCES

1. View on 5G Architecture – 5G-PPP. Version 3.0. Available from URL: https://5g-ppp.eu/wp-content/uploads/2019/07/5G-PPP-5G-Architecture-White-Paper_v3.0_PublicConsultation.pdf
2. Keshari S.K., Kansal V., Kumar S. A systematic review of quality of services (QoS) in software defined networking (SDN). *Wireless Personal Communications*. 2021;116(3):2593–2614. <https://doi.org/10.1007/s11277-020-07812-2>
3. Moravejosharieh A.H., Lloret J. Performance analysis of quality of service in software-defined networking. *Network Protocols and Algorithms*. 2019;10(4):1. <https://doi.org/10.5296/npa.v10i4.14054>
4. Nam Tuan Le, Arif Hossain M., Islam A., Do-yun Kim, Young-June Choi, Yeong Min Jang. Survey of promising technologies for 5G networks. *Mobile Information Systems*. 2016; Article ID 2676589. <https://doi.org/10.1155/2016/2676589>
5. OpenFlow. OpenFlow Switch Specification. Version 1.5.0. 2014. Available from URL: <https://opennetworking.org/wp-content/uploads/2014/10/openflow-switch-v1.5.0.pdf>
6. Fernandez M.P. Comparing openflow controller paradigms scalability: reactive and proactive. In: *Proc.*

7. Masoudi R., Ghaffari A. Software defined networks: A survey. *Journal of Network and Computer Applications*. 2016;67:1–25. <https://doi.org/10.1016/j.jnca.2016.03.016>
8. McKeown N., Anderson T., Balakrishnan H., Parulkar G., Peterson L., Rexford J., Shenker S., Turner J. OpenFlow: Enabling innovation in campus networks. *ACM SIGCOMM Computer Communication Review*. 2008;38(2):69–74. <https://doi.org/10.1145/1355734.1355746>
9. Karakus M., Durresi A. Quality of service (QoS) in software defined networking (SDN): A survey. *Journal of Network and Computer Applications*. 2017;200–218. <https://doi.org/10.1016/j.jnca.2016.12.019>
10. Paliwal M., Shrimankar D., Tembhumne O. Controllers in SDN: A review report. *IEEE Access*. 2018;6:36256–36270. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2018.2846236>
11. Salman O., Elhadj I.H., Kayssi A., Chehab A. SDN controllers: A comparative study. In: *2016 18th Mediterranean Electrotechnical Conference (MELECON)*. 2016, p. 1–6. <https://doi.org/10.1109/MELCON.2016.7495430>
12. Wibowo F.X.A., Gregory M.A., Ahmed K., Gomez K.M. Multi-domain software defined networking: Research status and challenges. *Journal of Network and Computer Applications*. 2017;87:32–45. <https://doi.org/10.1016/j.jnca.2017.03.004>
13. Zhang Y., Cui L., Wang W., Zhang Y. A survey on software defined networking with multiple controllers. *Journal of Network and Computer Applications*. 2018;103:101–118. <https://doi.org/10.1016/j.jnca.2017.11.015>
14. Karakus M., Durresi A. A survey: Control plane scalability issues and approaches in Software-Defined Networking. *Computer Networks*. 2017;112(7):279–293. <https://doi.org/10.1016/j.comnet.2016.11.017>
15. Singh A.K., Srivastava S. A survey and classification of controller placement problem in SDN. *International Journal of Network Management*. 2018;28(2):e–2018. <https://doi.org/10.1002/nem.2018>
16. OpenDaylight Project. URL: <https://www.opendaylight.org>
17. ONOS Project. URL: <http://onosproject.org>
18. Floodlight Project. URL: <https://floodlight.atlassian.net/wiki/spaces/HOME/overview?mode=global>
19. Scenarios, requirements and KPIs for 5G mobile and wireless system. ICT-317669-METIS/D1.1. May 2013. URL: <https://cordis.europa.eu/docs/projects/cnect/9/317669/080/deliverables/001-METISD11v1pdf.pdf>
20. Banovic-Curguz N., Ilisevic D. Mapping of QoS/QoE in 5G networks. In: *Proc. 2019 42nd International Convention on Information and Communication Technology, Electronics and Microelectronics (MIPRO)*. 2019, p. 404–408. <https://doi.org/10.23919/MIPRO.2019.8757034>
21. 5G-PPP. 5G Vision. The 5G infrastructure public private partnership: The next generation of communication networks and services. URL: <https://5g-ppp.eu/wp-content/uploads/2015/02/5G-Vision-Brochure-v1.pdf>
22. Концепция создания и развития сетей 5G/IMT-2020 в Российской Федерации (Проект). URL: <https://digital.gov.ru/uploaded/files/kontseptsiya-sozdaniya-i-razvitiya-setej-5g-imt-2020.pdf>
23. 5G Americas. Network slicing for 5G Networks and Services. URL: <https://www.5gamericas.org/network-slicing-for-5g-networks-services/>
7. Masoudi R., Ghaffari A. Software defined networks: A survey. *Journal of Network and Computer Applications*. 2016;67:1–25. <https://doi.org/10.1016/j.jnca.2016.03.016>
8. McKeown N., Anderson T., Balakrishnan H., Parulkar G., Peterson L., Rexford J., Shenker S., Turner J. OpenFlow: Enabling innovation in campus networks. *ACM SIGCOMM Computer Communication Review*. 2008;38(2):69–74. <https://doi.org/10.1145/1355734.1355746>
9. Karakus M., Durresi A. Quality of service (QoS) in software defined networking (SDN): A survey. *Journal of Network and Computer Applications*. 2017;200–218. <https://doi.org/10.1016/j.jnca.2016.12.019>
10. Paliwal M., Shrimankar D., Tembhumne O. Controllers in SDN: A Review Report. *IEEE Access*. 2018;6:36256–36270. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2018.2846236>
11. Salman O., Elhadj I.H., Kayssi A., Chehab A. SDN controllers: A comparative study. In: *2016 18th Mediterranean Electrotechnical Conference (MELECON)*. 2016, p. 1–6. <https://doi.org/10.1109/MELCON.2016.7495430>
12. Wibowo F.X.A., Gregory M.A., Ahmed K., Gomez K.M. Multi-domain software defined networking: Research status and challenges. *Journal of Network and Computer Applications*. 2017;87:32–45. <https://doi.org/10.1016/j.jnca.2017.03.004>
13. Zhang Y., Cui L., Wang W., Zhang Y. A survey on software defined networking with multiple controllers. *Journal of Network and Computer Applications*. 2018;103:101–118. <https://doi.org/10.1016/j.jnca.2017.11.015>
14. Karakus M., Durresi A. A survey: Control plane scalability issues and approaches in Software-Defined Networking. *Computer Networks*. 2017;112(7):279–293. <https://doi.org/10.1016/j.comnet.2016.11.017>
15. Singh A.K., Srivastava S. A survey and classification of controller placement problem in SDN. *International Journal of Network Management*. 2018;28(2):e–2018. <https://doi.org/10.1002/nem.2018>
16. OpenDaylight Project. Available from URL: <https://www.opendaylight.org>
17. ONOS Project. Available from URL: <http://onosproject.org>
18. Floodlight Project. Available from URL: <https://floodlight.atlassian.net/wiki/spaces/HOME/overview?mode=global>
19. Scenarios, requirements and KPIs for 5G mobile and wireless system. ICT-317669-METIS/D1.1. May 2013. Available from URL: <https://cordis.europa.eu/docs/projects/cnect/9/317669/080/deliverables/001-METISD11v1pdf.pdf>
20. Banovic-Curguz N., Ilisevic D. Mapping of QoS/QoE in 5G networks. In: *Proc. 2019 42nd International Convention on Information and Communication Technology, Electronics and Microelectronics (MIPRO)*. 2019, p. 404–408. <https://doi.org/10.23919/MIPRO.2019.8757034>
21. 5G-PPP. 5G Vision. The 5G infrastructure public private partnership: The next generation of communication networks and services. Available from URL: <https://5g-ppp.eu/wp-content/uploads/2015/02/5G-Vision-Brochure-v1.pdf>

24. IMT-2020 (5G) Promotion Group and 5G PPP Announce Memorandum of Understanding for 5G. URL: <https://5g-ppp.eu/imt-2020-5g-promotion-group-and-5g-ppp-announce-memorandum-of-understanding-for-5g/>
25. 5G Vision and Requirements of 5Gforum. URL: https://www.itu.int/dms_pub/itur/oth/0a/06/R0A0600005F0001PDFE.pdf
26. 5GMF White Paper. 5G Mobile Communications Systems for 2020 and Beyond. URL: https://5gmf.jp/wp/wp-content/uploads/2016/09/5GMF_WP101_All.pdf
27. Mohandas R., Aravindhar D.J. An intelligent dynamic bandwidth allocation method to support quality of service in internet of things. *International Journal of Computing*. 2021;20(2):254–261.
28. Hind S., Najib E.K., Fatima L. Towards QoS enhancement in wireless network through SDN. In: *2019 7th Mediterranean Congress of Telecommunications (CMT)*. 2019, p. 1–5. <https://doi.org/10.1109/CMT.2019.8931396>
22. Concept of creation and development of 5G/IMT-2020 networks in the Russian Federation. (in Russ.). Available from URL: <https://digital.gov.ru/uploaded/files/kontseptsiya-sozdaniya-i-razvitiya-setej-5g-imt-2020.pdf>
23. 5G Americas. Network Slicing for 5G Networks and Services. Available from URL: <https://www.5gamericas.org/network-slicing-for-5g-networks-services/>
24. IMT-2020 (5G) Promotion Group and 5G PPP Announce Memorandum of Understanding for 5G. Available from URL: <https://5g-ppp.eu/imt-2020-5g-promotion-group-and-5g-ppp-announce-memorandum-of-understanding-for-5g/>
25. 5G Vision and Requirements of 5Gforum. Available from URL: https://www.itu.int/dms_pub/itur/oth/0a/06/R0A0600005F0001PDFE.pdf
26. 5GMF White Paper. 5G Mobile Communications Systems for 2020 and Beyond. Available from URL: https://5gmf.jp/wp/wp-content/uploads/2016/09/5GMF_WP101_All.pdf
27. Mohandas R., Aravindhar D.J. An intelligent dynamic bandwidth allocation method to support quality of service in internet of things. *International Journal of Computing*. 2021;20(2):254–261.
28. Hind S., Najib E.K., Fatima L. Towards QoS enhancement in wireless network through SDN. In: *2019 7th Mediterranean Congress of Telecommunications (CMT)*. 2019, p. 1–5. <https://doi.org/10.1109/CMT.2019.8931396>

Об авторе

Данешманд Бехруз Мехди, аспирант, факультет инфокоммуникационных технологий Санкт-Петербургского национального исследовательского университета информационных технологий, механики и оптики (197101, Санкт-Петербург, Кронверкский пр-т, д. 49, лит. А). E-mail: daneshmandbehrooz@gmail.com.

About the author

Behrooz Daneshmand, Postgraduate Student, Faculty of Infocommunication Technologies, ITMO University (49–A, Kronverkskii pr., St. Petersburg, 197101 Russia). E-mail: daneshmandbehrooz@gmail.com.