

# АНАЛИЗ СОВРЕМЕННЫХ, УСТОЯВШИХСЯ МЕТОДОВ ПРИМЕНЕНИЯ ТЕХНОЛОГИИ SDN В 5G/IMT-2020

DOI: 10.36724/2072-8735-2021-15-10-28-37

Manuscript received 20 April 2021;

Accepted 02 June 2021

**Бехруз мехди Данешманд,**

Санкт-Петербургский национальный  
исследовательский университет информационных  
технологий, механики и оптики  
г. Санкт-Петербург, Россия,  
[daneshmandbehrooz@gmail.com](mailto:daneshmandbehrooz@gmail.com)

**Ключевые слова:** 5G/IMT-2020, SDN, сеть связи,  
программно-конфигурируемая сеть, виртуализация,  
использование SDN, контроллер SDN, сетевое  
оборудование, технология

В работе рассматривается применение технологии SDN в сетях 5G/IMT-2020, а именно даются ответы на вопросы: для чего используется технология SDN в сетях 5G/IMT-2020; как используется технология SDN в сетях 5G/IMT-2020; какова роль технологии SDN в сетях 5G/IMT-2020; каковы функции технологии SDN в сетях 5G/IMT-2020 и подобные. Но перед этим описывается, что представляет собой SDN и что представляет собой 5G/IMT-2020. В работе методы применения технологии SDN в сетях пятого поколения описываются и анализируются с точки зрения функции и роль, которые играют SDN в этих сетях. Обычно в литературе данная информация существует в разрозненном виде, а порой вовсе некоторые методы применения либо очень поверхностно описываются, либо вообще не описываются или их привязывают к другим методам. Целью работы являются выявление и анализ устоявшихся методов применения SDN в сетях 5G/IMT-2020. Для выявления вариантов применения SDN в сетях 5G/IMT-2020, изучались и анализировались архитектура SDN, преимущества SDN, общая архитектура сетей 5G/IMT-2020, стандарты и требования к сетям 5G/IMT-2020, протоколы сетей 5G/IMT-2020, некоторые существующие и будущие вероятные услуги сетей 5G/IMT-2020, общие концепции некоторых будущих сетей таких как тактильный интернет, интернет навыков, модельные сети и т.п. Приведена радиальная схема способов (вариантов) применения SDN в 5G/IMT-2020 и описан каждый вариант.

**Информация об авторе:**

**Бехруз Данешманд**, аспирант Санкт-Петербургского национального исследовательского университета информационных технологий, механики и оптики, факультет инфокоммуникационных технологий, г. Санкт-Петербург, Россия

**Для цитирования:**

Бехруз мехди Данешманд. Анализ современных, устоявшихся методов применения технологии SDN в 5G/IMT-2020 // T-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2021. Том 15. №10. С. 28-37.

**For citation:**

Daneshmand B. (2021) Analysis of modern standard application methods of software-defined network in 5G/IMT-2020. *T-Comm*, vol. 15, no.10, pp. 28-37. (in Russian)

## Введение

SDN, NFV и сети 5G/IMT-2020 вместе с Big Data и IoT становятся сегодня важнейшей частью главных основ цифровой экономики, главной опорой которой твёрдо стал современный искусственный интеллект (СИИ).

В рекомендации ITU-T Y.3101 [1], а также в источниках [2] и [3], приведены требования, которые необходимо поддерживать при построении сетей 5G/IMT-2020, в том числе необходимостью их создания на принципах SDN, которая является важнейшим требованием и практически выходит из категории просто рекомендации, а становится неотъемлемой частью процесса.

В связи этим важными и актуальными вопросами являлись и являются вопросы для чего и как использовать принципы SDN в сетях связи 5G/IMT-2020. На эти вопросы получено множество различных ответов со своими достоинствами и недостатками, отраженных в современных моделях и архитектурах сетей 5G/IMT-2020 и поиски продолжаются. Следовательно, эффективность сетей 5G/IMT-2020 сильно зависит от эффективности методов применения в них SDN. Поэтому важной и актуальной также является задача анализа существующих методов для понимания их принципов и определения их недостатки, а также понимания необходимости и границ применимости SDN в сетях 5G/IMT-2020. Обычно в литературе можно найти описание методов применения SDN в сетях 5G/IMT-2020 в разрозненном виде, а порой вовсе некоторые из этих методов либо очень поверхностно описаны, либо вообще не описываются или их приписывают к другим методам. Поэтому главная задача данной статьи состоит в выяснении, анализе и описании, как именно SDN используется в 5G/IMT-2020. Такой анализ позволяет определить не только роль и важность SDN для 5G/IMT-2020, но и потенциал будущих сетей, таких как тактильный интернет, интернет навыков, модельные сети и т.д.

Вопросами SDN занимаются ученые России и других стран: С. А. А. Мутханной, А. В. Шалимовым, А. Е. Кучерявым, К. Е. Самуйловым, С. Н. Степановым, Р. Л. Смелянским, А. А. В. Росляковым, В. Г. Карташевским, Е. А. Кучерявым, М. А. Р. В. Киричком, А. Tootoonchian, R. Sherwood, O. Salman, Y. Zhao и др.

А Вопросами 5G/IMT-2020 занимаются российские и зарубежные ученые: Б. С. Цыбаков, В.М. Вишневого, О. В. Масленников, Б. С. Лившиц, Б.С. Гольдштейна, Г. П. Башарин, В.Г. Карташевского, Н. А. Соколов, А.Е. Кучерявого, С. Н. Степанов, А.И. Парамонова, А. Д. Харкевич, К.Е. Самуйлова, В. К. Сарьян, М.А. Сиверса, Р.В.Киричка, О. И. Шелухин, С.Д. Андреева, Е.А. Кучерявого, А.В. Рослякова, В.О. Тихвинского, А.Е. Рыжкова, А.С.А. Мутханной, Т. Rappoport, A. Jensen, J. Andrews, W. Willinger, J. Araniti, W.E. Leland, S. Rangan, M. Dohler, P. Tran-Gia, N. Himayat, V. B. Iversen, S. Singh, I. Norros, F. Baccelli и др.

Цель работы состоит в выявлении, анализе и описании методов применения SDN в сетях 5G/IMT-2020.

Данная цель требует решения следующих задач:

- ✓ рассмотрение концепции SDN;
- ✓ рассмотрение концепции сети связи 5G/IMT-2020;
- ✓ рассмотрение методов применения SDN в сетях 5G/IMT-2020.

## 1. Концепция SDN

SDN – это вычислительная сеть, полностью конфигурируемая программно, в которой уровни управления самой сетью и передачи данных отделены друг от друга выносом функций управления на отдельное устройство – контроллер сети.

SDN определяется способностью динамически управлять поведением сети с помощью программного обеспечения (ПО) через открытые интерфейсы. Основным отличием SDN от привычных сетей является централизованное интеллектуальное управление сетью и мониторинг, которые позволяют проверять, контролировать и изменять передаваемые потоки данных.

SDN позволяют:

- ✓ повышение эффективности использования физических сетевых ресурсов;
- ✓ удешевление эксплуатации сети;
- ✓ упрощение и автоматизацию управления сетью;
- ✓ ускорение и автоматизацию процесса создания новых сервисов и их запуска;
- ✓ повышение безопасности всей инфокоммуникационной системы;
- ✓ и др.

Главные столбы SDN заключаются в следующем [4]-[11]:

- ✓ отделение уровня администрирования сети и трансмиссии данных;
- ✓ единый стандартизованный интерфейс интеграции уровней администрирования сети и трансмиссии данных;
- ✓ управление сетью с помощью централизованного вычислительного устройства – контроллера сети;
- ✓ предельное применение виртуализации сетевого оборудования.

Общая концепция SDN приведена на рисунке 1.

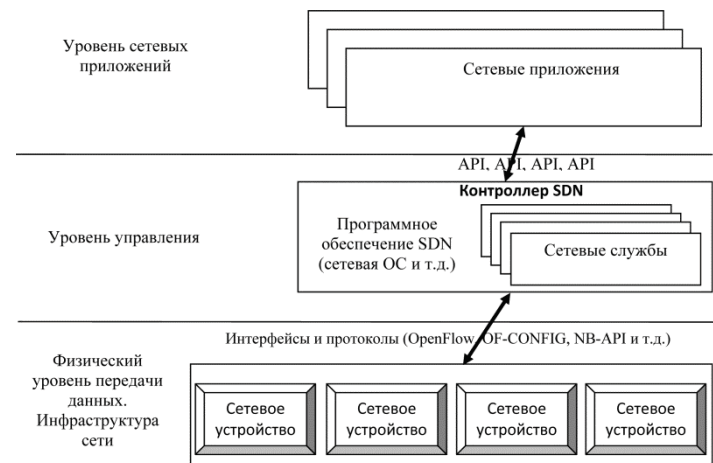


Рис. 1. Общая концепция SDN

SDN имеют следующие главные части:

- ✓ часть сетевых устройств: коммутаторы (switches), маршрутизаторы (routers) и каналы трансмиссии данных (channels);
- ✓ часть администрирования сети или контроллерная часть;
- ✓ часть сетевых приложений или прикладная часть.

Взаимодействием между главными частями SDN осуществляется на основе протоколов, более известным из которых является протокол OpenFlow.

## 2. Концепция сети 5G/IMT-2020

5G/IMT-2020 – это инфокоммуникационный стандарт связи нового пятого поколения с многообещающими возможностями.

Сети 5G/IMT-2020 обещают высокую пропускную способность до 100 Мбит/с и сверхнизкую задержку в 1 мс. По данным Cisco VNI Mobile 2020<sup>1</sup> года, в анализе всеобщего мобильного трафика по типу сети, 5G/IMT-2020 сети будут обеспечивать очень высокие объемы трафика в 12% от всего мобильного трафика.

На рисунке 2 представлена ценность сети 5G/IMT-2020 в сопоставлении с 4G/IMT-Advanced.



Рис. 2. Ценность 5G/IMT-2020.

(Источник: Emerging Trends in 5G/IMT-2020, 2016, ITU)

На рисунке 3 показаны степени важности характеристик (см рис. 2) главного функционала 5G/IMT-2020, состоящего в:

- ✓ усовершенствовании eMMB (мобильного широкополосного доступа);
- ✓ гарантировании надёжности и скорости коммуникации;
- ✓ гарантировании высокого объема трафика межмашинной коммуникации.

Сети 1G, 2G, 3G и 4G основываются на аппаратных решениях, в то время как система 5G/IMT-2020 полностью базируется на программных решениях, а именно SDN, а также NFV.



Рис. 3. Важность характеристик главного функционала сети 5G/IMT-2020.

(Источник: Emerging Trends in 5G/IMT-2020, 2016, ITU)

На рисунке 4 показан переход от аппаратной сети (указаны ее главные недостатки) к программной сети, т.е. к виртуальной системой SDN/NFV (указаны ее главные преимущества).

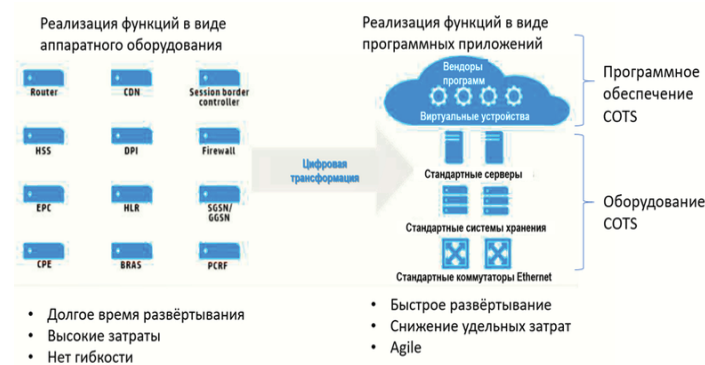


Рис. 4. Переход к виртуальной системе SDN/NFV в 5G/IMT-2020.

(Источник: HPE, TAdviser) COTS (Commercial Off The Shelf) – стандартное коммерческое оборудование

То есть сети 5G/IMT-2020 – это сети с программируемыми параметрами, виртуализацией сетевых функций, разделением функциональной архитектуры и базовой физической инфраструктуры, интерфейсами прикладного программирования (API).

На рисунке 5 представлена общая структурная схема сети 5G/IMT-2020.

<sup>1</sup> Global Mobile Traffic by Network Type By 2022, 5G will carry 12% of mobile data traffic [https://www.cisco.com/c/dam/m/en\\_us/network-intelligence/service-provider/digital-transformation/knowledge-network-webinars/pdfs/190320-mobility-ckn.pdf](https://www.cisco.com/c/dam/m/en_us/network-intelligence/service-provider/digital-transformation/knowledge-network-webinars/pdfs/190320-mobility-ckn.pdf) (дата обращения: 18.07.2020).

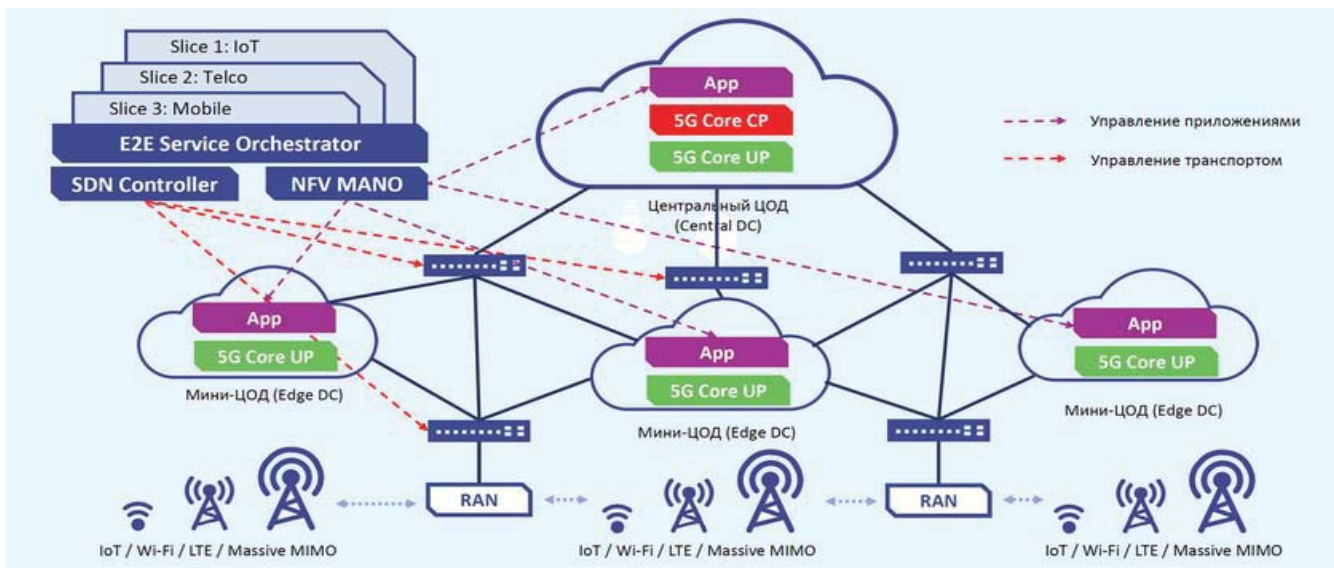


Рис. 5. Общая архитектура сети 5G.

(Источник: Центр прикладных исследований компьютерных сетей (ЦПИКС) «Сколково»: официальный сайт [Электронный ресурс]. <http://www.arccn.ru/> (дата обращения: 20.07.2020).

SDN преобразовывают традиционные сети и позволяют оптимизировать управление сетью наиболее эффективным образом.

Теперь, когда есть представление о том, что такое SDN и 5G/IMT-2020, рассмотрим, для чего и как применяется SDN в 5G/IMT-2020, что и является основным вопросом данной работы.

### 3. Методы использования SDN в 5G/IMT-2020

По требованиям [1] принятых стандартов сетей 5G/IMT-2020, их нужно создавать на базе технологий SDN/NFV. Эти требования гласят:

- ✓ осуществление на основе одной и той же сетевой платформе различных типов сервисов и приложений;
- ✓ осуществление сетевой сегментации (слайсинга сетей);
- ✓ осуществление быстрого внедрения новых сервисов и приложений и их диспетчеризация по сегментам сети;
- ✓ осуществление динамического распределения трафика сетей;
- ✓ осуществление программируемости услуг, виртуальных и физических ресурсов и их мониторинга;
- ✓ осуществление интеллектуализации управления сетевыми ресурсами, в том числе радио-ресурсами (пропускная способность, радиочастотный спектр и т.д.);
- ✓ осуществление виртуализации сотовых и выделенных сетей множества различных операторов (Mobile Virtual Network Operator – MVNO);
- ✓ осуществление гарантированного QoS (Quality of Service) и сетей, ориентированных на информацию;
- ✓ осуществление полностью централизованного автоматизированного управления сетью.

В результате анализа приведенных требований, а также источников [2]-[20], автор выделил основные методы применения SDN в сетях 5G/IMT-2020, которые представлены

на рисунке 5 и описаны ниже. Таким образом, получили ответы на следующие семантически равносильные вопросы:

- ✓ Для чего используется технология SDN в сетях 5G/IMT-2020?
- ✓ Как используется технология SDN в сетях 5G/IMT-2020?
- ✓ Какова роль технологии SDN в сетях 5G/IMT-2020?
- ✓ Каковы функции технологии SDN в сетях 5G/IMT-2020?

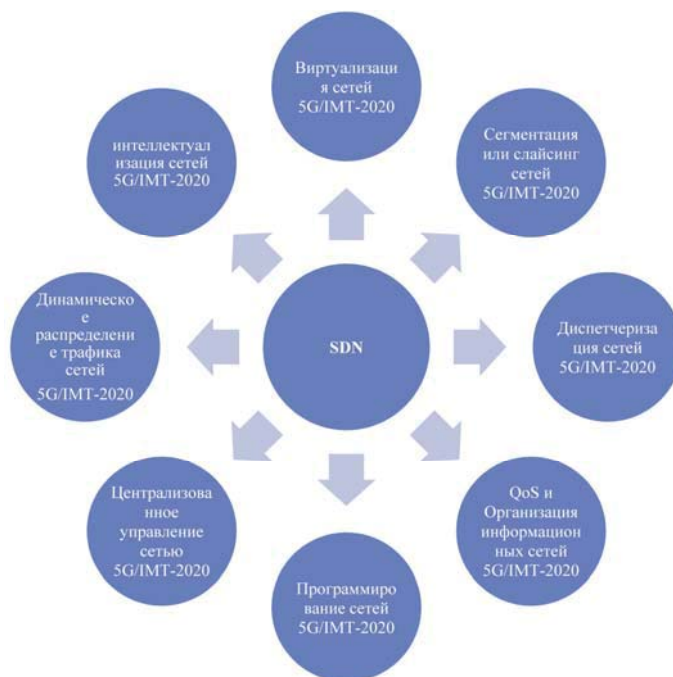


Рис. 6. Применение SDN в 5G/IMT-2020. (Источник: Автор)

Теперь опишем каждое применение SDN в отдельности.

### 3.1. Программирование сетей 5G/IMT-2020

Программируемость сети подразумевает наивысшее использование программирования и программных средств на всех уровнях сети вместо аппаратных средств [12], [13], а также программная автоматизация всех процессов конфигурации и управления сетью [21]-[32].

В SDN центральное место занимает программируемость сети [4]-[13], что отражено в названии технологии. Программируемость сети означает ее динамическую конфигурацию, ее высокую гибкость, простоту управления ею и т.д. Ведь для достижения нужной гибкости и простоты управления нужна динамическая конфигурация инфраструктурных ресурсов сети для их изменения и адаптации к новым требованиям и условиям [4]-[11].

Для сетей 5G/IMT-2020, исходя из требований [1] нужны методы и механизмы разработки программ и сервисов поверх гибкой инфраструктуры в разных технологических областях [6]. Поэтому использование SDN в них является экзистенциальной необходимостью, так как им необходима архитектура управления с высоким уровнем программируемости, независимая от сценария ее использования и позволяющая администратору сети программировать различные алгоритмы для надёжности и оптимизации работы сети.

SDN переносит всю мощь и все преимущества программируемости и программирования в сеть 5G/IMT-2020 [21]-[32], что гарантирует их гибкость и множество высоких возможностей. Однако SDN переносит и некоторые недостатки программируемости и программирования в сеть 5G/IMT-2020.

Главными проблемами с SDN являются:

- Нельзя гарантировать отсутствие багов в программном обеспечении.

- Уязвимости в API и в базовом программном обеспечении могут сильно ослабить безопасность SDN и ограничить их применимость в некоторых случаях.

- Нельзя гарантировать, что закрытые программные средства производителя содержат только ту функциональность, которая описана в документации, а в SDN такая функциональность может быть и распределенной.

### 3.2. Виртуализация сетей 5G/IMT-2020

Виртуализация является одной из важнейших идей SDN и позволяет на сегодня наиболее эффективным образом использовать инфраструктурные сетевые ресурсы [4]-[13], [24], [25], [29], [30], [33], [34].

Виртуализация обеспечивает необходимые инструменты и подходы для абстрагирования от физической основы вычислительной системы [11], [13]. Это позволяет более гибко и легко работать с физическими ресурсами сети [24], [25], [29], [30], [33], [34]. Например, при работе с сервером без применения технологии виртуализации, при возникновении с ним проблем, то приходится подменить его на новый физический сервер, и пройти весь путь конфигурирования нового сервера, при этом нет гарантий, что все будет гладко и заработает как раньше. Если же сервер был виртуальным, то его можно просто заменить копией даже на другой аппаратной основе.

Виртуализация также позволяет снизить нагрузку на виртуальный сервер. Для этого достаточно создать копии виртуального сервера и распределить нагрузку между ними.

Она позволяет [13]-[15], [24], [25], [29], [30], [33], [34]:

- наиболее эффективным образом использовать сетевые ресурсы и организовать балансировку нагрузки на них;
- изолировать потоки данных разных пользователей и приложений;

- создать различные виртуальные сети поверх физической сети и дать администраторам этих сетей возможность использовать свои политики управления ими.

Виртуальные сети изолированы друг от друга для обеспечения безопасности и производительности.

Технологии виртуализации, реализованные в SDN используются в 5G/IMT-2020 совместно с возможностями технологии NFV.

Виртуализацией ресурсов SDN является, например, деление сети на сегменты и управлять каждой из них в отдельности. Для этого можно применить инструмент FlowVisor - прокси программа, обычно находящаяся между OpenFlow-коммутаторами и контроллерами SDN.

Основными недостатками виртуализации являются:

- Большое количество одновременно работающих виртуальных сетей потребует достаточного числа инфраструктурных сетевых ресурсов и мощностей.

- Общая физическая основа вычислительной системы может выйти из строя частично или полностью, соответственно все виртуальные сети не будут работать. Необходимо подумать об отказоустойчивости изначально.

- Трудность эмуляции всех сетевых устройств.

### 3.3. Сегментация или слайсинг сетей 5G/IMT-2020

Приложение виртуализации SDN и NFV к сетям 5G/IMT-2020 позволяет реализовать в них такую важную концепцию как сегментация сети или по-другому сетевой слайсинг. Сегментация сети по определению Консорциума 3GPP позволяет оператору сети построить множество виртуальных сетей с различными целями и вариантами использования на основе одной и той же физической инфраструктуры [6], [10]-[16]. Каждая такая виртуальная сеть индивидуально и может применить свои принципы адресации, свои методы и алгоритмы маршрутизации, свою систему администрирования QoS и т.д. [35], [36].

Сетевой сегмент – это логическая сеть автоматически выделенных потребителю физических и виртуальных сетевых ресурсов SDN по его просьбе [35], [36].

По ITU-T (МСЭ-Т) сетевые срезы рассматриваются как логически изолированные сегменты сети, объединяющие виртуальные ресурсы с программируемым управлением и плоскостью данных [1].

Наряду с виртуализацией, важным процессом сетевой сегментации также является оркестровка (Orchestration) [37], [38], [39]. Оркестровка представляет собой технология согласованного объединения разрозненных объектов в единое целое. По Open Network Foundation (ONF), оркестровка представляет собой неразрывный процесс отбора необходимых сетевых ресурсов по настраиваемым критериям оптимизации и текущим потребностям клиентов.

На базе SDN и NFV сетевой слайсинг позволяет обеспечить гибкий, многопрофильный, многопользовательский и сервисный набор 5G/IMT-2020 мобильных сетей с высокой пропускной способностью [35], [36].

Кроме того сегментация сети может быть использована для развертывания нескольких копий мобильной сети

5G/IMT-2020 одного и того же оператора мобильной связи, но каждая копия реализует свой вариант использования со своим набором требований и критерий оценки качества. Например, копия для тактильного интернета, копия для IoT, копия для интернета навыков, копия для мобильной широкополосной связи и т.д.

Основными минусами сетевого слайсинга являются:

- сложность изоляции слайсов;
- сложность оркестровки;
- минусы при виртуализации (см. выше).

### 3.4. Интеллектуализация сетей 5G/IMT-2020

Под интеллектуальностью сети подразумевается ее способность автоматически вырабатывать и принять решения по результатам интеллектуального анализа большого количества данных о состоянии ее компонент [40], [41], [42].

SDN контроллер имеет глобальное сетевое представление, позволяющее автоматически собирать трафик и провести его интеллектуальный анализ [43]-[47], что в свою очередь делает сети 5G/IMT-2020 интеллектуальными.

Собранная статистика также позволяет прогнозировать QoS и QoE в сетях 5G/IMT-2020 [48]-[51].

Многие считают, что централизованное управление SDN является ее узким местом технологии, так как при обрыве связи между контроллером SDN и коммутаторами сети, те переходят в состояние по умолчанию и будут неуправляемыми или вовсе неработоспособными в случае обязательной связи с контроллером. Контроллер SDN становится единой точкой отказа. Для избегания такой сценарии, нужно предусматривать различные механизмы обеспечения отказоустойчивости и надёжности сети.

В настоящее время такие механизмы разрабатываются и совершенствуются с применением принципов и технологий искусственного интеллекта, что делает сети на базе SDN более надежными и интеллектуальными [17], [18], [19]. Среди прочих отметим: защитное переключение или резервирование, восстановление или перемаршрутизация.

Основной минус здесь – это сложность алгоритмов и технологий интеллектуализации сети.

### 3.5. Диспетчеризация сетей 5G/IMT-2020

Диспетчеризация в 5G/IMT-2020 осуществляется контроллером SDN следующим образом [21]-[39]:

- a) Контроллер получает потоки из плоскости данных.
- b) Контроллер организует и администрирует политику маршрутизации потоков.
- c) Каждый поток проверяется контроллером в соответствии с политикой SDN-сети и при удовлетворительном ответе пропускается дальше; для него определяется контроллером маршрут продвижения и заполняется все таблицы потоков коммутаторов выбранного маршрута.

В свою очередь коммутаторы осуществляют движение пакетов трафика в соответствии с информацией в своих таблицах потоков, определенной контроллером SDN. Общение контроллера SDN с коммутаторами организуется протоколом, например известным протоколом OpenFlow.

Концепция SDN допускает различные конфигурации коммутаторов и уровней протоколов.

Коммутатор в SDN осуществляет следующие задачи:

- отправка начального пакета потока контроллеру SDN для получения допуска дальнейшего продвижения;

- отправка последующих пакетов, поступающих к нему в порт по информации в своей таблице потоков со строгим соблюдением приоритетов, определенных контроллером SDN;

- отмена передачи пакетов определенного потока по приказу контроллера SDN. Отмена пакетов может быть связана с политикой безопасности или требованиями управления трафиком.

Основным минусом при диспетчеризации сети является централизованное управление таблицами потоков коммутаторов контроллером, так как при обрыве связи между контроллером SDN и коммутаторами сети, те переходят в состояние по умолчанию и будут неуправляемыми или вовсе неработоспособными в случае обязательной связи с контроллером.

### 3.6. Динамическое распределение трафика сетей 5G/IMT-2020

Контроллер SDN определяет маршрут потока трафика и управляет состоянием пересылки коммутаторов в SDN. Он может снять пакеты с одного коммутатора и передать другому. Это позволяет ему по результатам интеллектуального анализа данных [40]-[47] перераспределить нагрузки на коммутаторах и тем самым динамически распределить трафик. Такое управление он выполняет с помощью API, поэтому он может выполнить различные требования приложения без необходимости изменять что-либо на более низком уровне сети.

Все сетевые приложения имеют в контроллере SDN доступ к одному и тому же API. Поэтому можно быстро реализовать и внедрять новые приложения для формирования потока сетевого трафика по конкретным требованиям производительности или безопасности.

Главными минусами тут являются:

- централизованное управление перераспределением трафика, но это также и преимущество;
- сложность механизмов перераспределения нагрузки на коммутаторах;
- нет гарантии точности и достоверности результатов интеллектуального анализа, по которым и осуществляется перераспределение нагрузки на коммутаторах.

### 3.7. Централизованное управление сетью 5G/IMT-2020

Централизованное управление сетью осуществляется при помощи контроллера SDN [21]-[39]. Контроллер полностью под властью сетевого администратора. Под властью же контроллера находится один или некоторый набор коммутаторов. На контроллере установлена сетевая ОС, которая выполняет мониторинг и организацию работы как сетевых ресурсов в отдельности, так и всей сети в целом.

Сетевая ОС организует работу сетевых служб и имплементирует механизмы ведения таблиц потоков коммутаторов: вставка, удаление, изменение правил и сбор различного вида статистики.

Сетевая ОС также формирует представление о топологии физической сети, управляемой контроллером, тем самым централизуя управление.

Главными недостатками централизованного управления сетью являются:

- ослабление надежности сети,
- ослабление отказоустойчивости сети,
- ослабление масштабируемости сети.

### 3.8. QoS и организация информационных сетей 5G/IMT-2020

Концепция SDN ставит в центр контроллер с сетевой ОС, который управляет коммутаторами и непрерывно собирает статистические данные о работе коммутаторов, их портов и уровнях детализации трафика. Далее эта статистика служит основой интеллектуального анализа и для прогнозирования таких показателей как QoS и QoE в сетях 5G/IMT-2020 [40]-[51].

Для QoS оцениваются разнообразные показатели сети, среди которых: изменение пакетов, потеря пакетов, латентный период [48], пропускная способность, джиттер и т. д.

SDN контроллер в сетях 5G/IMT-2020 динамически управляет QoS [20] по результатам обработки и интеллектуального анализа всей собранной им статистику и с учетом текущих потребностей на основе методов машинного обучения. Это позволит не только обнаруживать дефекты и проблемы в сетях 5G/IMT-2020, но вовремя реагировать на них наиболее адекватным способом и этим самоорганизоваться в сторону настоящих интеллектуальных современных информационно-управленческих сетей.

Недостатки здесь в основном связаны со сложностью, точностью и доступностью технологий интеллектуального анализа данных и принятия решений.

#### Заключение

В работе описаны концепции технологий SDN и сети связи 5G/IMT-2020. Рассмотрено применение SDN в сетях связи 5G/IMT-2020, а именно даны ответы на вопросы: Для чего используется технология SDN в сетях 5G/IMT-2020?, Как используется технология SDN в сетях 5G/IMT-2020?, Какова роль технологии SDN в сетях 5G/IMT-2020?, Каковы функции технологии SDN в сетях 5G/IMT-2020?

В работе выявлены, анализированы и описаны основные методы применения технологии SDN в сетях пятого поколения. Указаны их преимущества и недостатки. Описаны и анализированы с точки зрения функции и роль, которые играют SDN в сетях 5G/IMT-2020 следующие методы использования SDN:

- метод использования SDN для программирования сетей 5G/IMT-2020;
- метод использования SDN для виртуализации сетей 5G/IMT-2020;
- метод использования SDN для сегментации сетей 5G/IMT-2020;
- метод использования SDN для интеллектуализации сетей 5G/IMT-2020;
- метод использования SDN для диспетчеризации сетей 5G/IMT-2020;
- метод использования SDN для динамического распределения трафика сетей 5G/IMT-2020;
- метод использования SDN для централизованного управления сетями 5G/IMT-2020;
- метод использования SDN для динамического управления QoS в сетях 5G/IMT-2020 и организации информационно-управленческих сетей 5G/IMT-2020.

По этим методам применения, можно видеть, что SDN играют огромную роль в сетях 5G/IMT-2020 и позволяют строить реальные гибкие и масштабируемые сети 5G/IMT-

2020, специализированные в отношении решаемых задач и с контроллерами, позволяющие управление работой обширных групп коммутаторов с должной интеллектуальностью и уровнем обеспечения QoS.

Нужно также отметить, что указанные недостатки различных методов применения SDN в сетях 5G/IMT-2020 не являются препятствием, так как все они решаемы и решаются в настоящее время.

#### Литература

1. Recommendation ITU-T Y.3101 «Requirements of the IMT-2020 network», 2018.
2. 3GPP TS 22.261 V16.5.0 «Service requirements for the 5G system», фаза 1, релиз 16, сентябрь 2018 г.
3. 3GPP TS 23.501 V15.0.0 «System Architecture for the 5G System», Release 15, 2018-09.
4. *Абдельмоталеб Абдельхамид Ашраф Атея*. Исследование и разработка методов построения сетей связи пятого поколения 5G, обеспечивающих выполнение требований концепций тактильного интернета. СПбГУТ им профессора М. А. Бонч-Бруевича. Диссертация. Санкт-Петербург 2019.
5. *Бородин Алексей Сергеевич*. Разработка и исследование методов построения сетей связи пятого поколения. СПбГУТ им профессора М. А. Бонч-Бруевича. Диссертация. Санкт-Петербург 2019.
6. *Мухизи Самуэль*. Разработка моделей и методов сегментации ресурсов в программно-конфигурируемых сетях. СПбГУТ им профессора М. А. Бонч-Бруевича. Диссертация. Санкт-Петербург 2019.
7. *Саломатина Елена Васильевна*. Разработка моделей телекоммуникационных информационно-управленческих сетей и методов их эффективного использования. НИИР. Диссертация. Москва 2019.
8. *Галич Сергей Владимирович*. Исследование и анализ задержки обработки трафика управления в программно-конфигурируемых сетях. Волгоградский государственный университет. Диссертация. Волгоград 2018.
9. *Javier Guillermo*. How 5G Relates to SDN and NFV Technologies – Part I: Introduction and History. DELL Technologies, 2019. [https://infocus.delltechnologies.com/javier\\_guillermo/how-5g-relates-to-sdn-and-nfv-technologies-part-i-introduction-and-history](https://infocus.delltechnologies.com/javier_guillermo/how-5g-relates-to-sdn-and-nfv-technologies-part-i-introduction-and-history). (Дата обращения 23.08.2020)
10. *Javier Guillermo*. How 5G Relates to SDN and NFV Technologies – Part II: Architecture. DELL Technologies, 2019 [https://infocus.delltechnologies.com/javier\\_guillermo/how-5g-relates-to-sdn-and-nfv-technologies-part-ii-architecture/](https://infocus.delltechnologies.com/javier_guillermo/how-5g-relates-to-sdn-and-nfv-technologies-part-ii-architecture/). (Дата обращения 23.08.2020)
11. *Javier Guillermo*. How 5G Relates to SDN and NFV Technologies – Part III: Architecture (Continued). DELL Technologies, 2019 [https://infocus.delltechnologies.com/javier\\_guillermo/how-5g-relates-to-sdn-and-nfv-technologies-part-iii-architecture-continued/](https://infocus.delltechnologies.com/javier_guillermo/how-5g-relates-to-sdn-and-nfv-technologies-part-iii-architecture-continued/). (Дата обращения 23.08.2020)
12. *Z. Zaidi, V. Friderikos, Z. Yousof, S. Fletcher, M. Dohler and H. Aghvami*, "Will SDN Be Part of 5G?," in IEEE Communications Surveys & Tutorials, vol. 20, no. 4, pp. 3220-3258, Fourthquarter 2018, doi: 10.1109/COMST.2018.2836315.
13. *Massimo Condoluci, Toktam Mahmoodi*. Softwarization and virtualization in 5G mobile networks: Benefits, trends and challenges. Computer Networks, Vol. 146, 9 December 2018, P. 65-84. <https://doi.org/10.1016/j.comnet.2018.09.005>
14. *Barakabitze, A.A., Ahmad, A., Mijumbi, R., Hines, A.* 5G network slicing using SDN and NFV: A survey of taxonomy, architectures and future challenges Computer Networks, Vol. 167, 11 February 2020. <https://doi.org/10.1016/j.comnet.2019.10694>
15. *H. Zhang, N. Liu, X. Chu, K. Long, A. Aghvami and V. C. M. Leung*, "Network Slicing Based 5G and Future Mobile Networks: Mobility, Resource Management, and Challenges," in IEEE Communications Magazine, vol. 55, no. 8, pp. 138-145, Aug. 2017, doi: 10.1109/MCOM.2017.1600940.
16. *Long, Q., Chen, Y., Zhang, H. et al.* Software Defined 5G and 6G Networks: a Survey. Mobile Netw Appl (2019). SpringerLink. <https://doi.org/10.1007/s11036-019-01397-2>
17. *Pradhan, A., Mathew, R.* Solutions to Vulnerabilities and Threats in Software Defined Networking (SDN). Procedia Computer Science, Vol. 171, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2020.04.280>.
18. *Shahryari, S., Hosseini-Seno, S.-A., Tashtarian, F.* An SDN based framework for maximizing throughput and balanced load distribution in a Cloudlet network. Future Generation Computer Systems, Vol. 110, September 2020. <https://doi.org/10.1016/j.future.2020.04.009>

19. H. Zhou et al., "SDN-RDCD: A Real-Time and Reliable Method for Detecting Compromised SDN Devices," in *IEEE/ACM Transactions on Networking*, vol. 26, no. 5, pp. 2048-2061, Oct. 2018, doi: 10.1109/TNET.2018.2859483.
20. A. Binsahaq, T. R. Sheltami and K. Salah, "A Survey on Autonomic Provisioning and Management of QoS in SDN Networks," in *IEEE Access*, vol. 7, pp. 73384-73435, 2019, doi: 10.1109/ACCESS.2019.2919957.
21. Shahram Jamali, Amin Badirzadeh, Mina Soltani Siapoush. On the use of the genetic programming for balanced load distribution in software-defined networks, *Digital Communications and Networks*, Vol. 5, Issue 4, 2019, P. 288-296. <https://doi.org/10.1016/j.dcan.2019.10.002>.
22. Sandhya, Yash Sinha, K. Haribabu. A survey: Hybrid SDN, *Journal of Network and Computer Applications*, Vol. 100, 2017, P. 35-55. <https://doi.org/10.1016/j.jnca.2017.10.003>.
23. Sibylle Schaller, Dave Hood. Software defined networking architecture standardization, *Computer Standards & Interfaces*, Volume 54, Part 4, 2017, Pages 197-202. <https://doi.org/10.1016/j.csi.2017.01.005>.
24. Bego Blanco, Jose Oscar Fajardo, Ioannis Giannoulakis, Emmanouil Kafetzakis, Shuping Peng, Jordi Pérez-Romero, Irena Trajkovska, Pouria S. Khodashenas, Leonardo Goratti, Michele Paolino, Evangelos Sfakianakis, Fidel Liberal, George Xilouris. Technology pillars in the architecture of future 5G mobile networks: NFV, MEC and SDN, *Computer Standards & Interfaces*, Vol. 54, Part 4, 2017, P. 216-228. <https://doi.org/10.1016/j.csi.2016.12.007>.
25. Pedro Neves, Rui Calé, Mário Costa, Gonçalo Gaspar, Jose Alcaraz-Calero, Qi Wang, James Nightingale, Giacomo Bernini, Gino Carrozze, Ángel Valdivieso, Luis Javier García Villalba, Maria Barros, Anastasios Gravas, José Santos, Ricardo Maia, Ricardo Preto. Future mode of operations for 5G – The SELFNET approach enabled by SDN/NFV, *Computer Standards & Interfaces*, Vol. 54, Part 4, 2017, P. 229-246. <https://doi.org/10.1016/j.csi.2016.12.008>.
26. Sudha Anbalagan, Dhananjay Kumar, Gunasekaran Raja, Alkondan Balaji. SDN assisted Stackelberg Game model for LTE-WiFi offloading in 5G networks, *Digital Communications and Networks*, Vol. 5, Issue 4, 2019, P. 268-275. <https://doi.org/10.1016/j.dcan.2019.10.006>.
27. Anshu Bhardwaj. 5G for Military Communications, *Procedia Computer Science*, Vol. 171, 2020, P. 2665-2674. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2020.04.289>.
28. Fernando Zanferrari Morais, Cristiano André da Costa, Antonio Marcos Alberti, Cristiano Bonato Both, Rodrigo da Rosa Righi. When SDN meets C-RAN: A survey exploring multi-point coordination, interference, and performance, *Journal of Network and Computer Applications*, Vol. 162, 2020, 102655. <https://doi.org/10.1016/j.jnca.2020.102655>.
29. E. Schiller, N. Nikaiein, E. Kalogreitou, M. Gasparyan, T. Braun. CDS-MEC: NFV/SDN-based Application Management for MEC in 5G Systems, *Computer Networks*, Vol. 135, 2018, P. 96-107. <https://doi.org/10.1016/j.comnet.2018.02.013>
30. Ian F. Akyildiz, Shih-Chun Lin, Pu Wang. Wireless software-defined networks (W-SDNs) and network function virtualization (NFV) for 5G cellular systems: An overview and qualitative evaluation, *Computer Networks*, Vol. 93, Part 1, 2015, P. 66-79. <https://doi.org/10.1016/j.comnet.2015.10.013>
31. Junseok Kim, Dongmyoung Kim, Sunghyun Choi. 3GPP SA2 architecture and functions for 5G mobile communication system, *ICT Express*, Volume 3, Issue 1, 2017, Pages 1-8. <https://doi.org/10.1016/j.ict.2017.03.007>.
32. Guido Maier, Martin Reisslein. Transport SDN at the dawn of the 5G era, *Optical Switching and Networking*, Vol. 33, 2019, P. 34-40. <https://doi.org/10.1016/j.osn.2019.02.001>.
33. Bo Yi, Xingwei Wang, Keqin Li, Sajal k. Das, Min Huang. A comprehensive survey of Network Function Virtualization, *Computer Networks*, Vol. 133, 2018, P. 212-262. <https://doi.org/10.1016/j.comnet.2018.01.021>
34. L. Atzori, J.L. Bellido, R. Bolla, G. Genovese, A. Iera, A. Jara, C. Lombardo, G. Morabito. SDN&NFV contribution to IoT objects virtualization, *Computer Networks*, Vol. 149, 2019, P. 200-212. <https://doi.org/10.1016/j.comnet.2018.11.030>.
35. Muhammad Afaq, Javed Iqbal, Talha Ahmed, Ihtesham Ul Islam, Murad Khan, Muhammad Sohail Khan. Towards 5G network slicing for vehicular ad-hoc networks: An end-to-end approach, *Computer Communications*, Vol. 149, 2020, P. 252-258. <https://doi.org/10.1016/j.comcom.2019.10.018>.
36. Sokratis Barmponakis, Nikolaos Maroulis, Michael Papadakis, George Tsatsios, Dimitrios Soukaras, Nancy Alonistioti. Network slicing – enabled RAN management for 5G: Cross layer control based on SDN and SDR, *Computer Networks*, Vol. 166, 2020, 106987. <https://doi.org/10.1016/j.comnet.2019.106987>.
37. Slannik-Kriještorac, N.; de Brito e Silva, E.; Municio, E.; Carvalho de Resende, H.C.; Hadiwardoyo, S.A.; Marquez-Barja, J.M. Network Service and Resource Orchestration: A Feature and Performance Analysis within the MEC-Enhanced Vehicular Network Context. *Sensors* 2020, 20, 3852. <https://doi.org/10.3390/s20143852>
38. Charalampos Rotsos, Daniel King, Arsham Farshad, Jamie Bird, Lyndon Fawcett, Nektarios Georgalas, Matthias Gunkel, Kohei Shiimoto, Aijun Wang, Andreas Mauthe, Nicholas Race, David Hutchison. Network service orchestration standardization: A technology survey, *Computer Standards & Interfaces*, Vol. 54, 4, 17, P. 5. <https://doi.org/10.1016/j.csi.2016.12.006>.
39. Luis M. Vaquero, Felix Cuadrado, Yehia Elkhatib, Jorge Bernal-Bernabe, Satish N. Srirama, Mohamed Faten Zhani. Research challenges in nextgen service orchestration, *Future Generation Computer Systems*, Vol. 90, 2019, P. 20-38. <https://doi.org/10.1016/j.future.2018.07.039>.
40. Huertas Celdrán, A.; Ruipérez-Valiente, J.A.; García Clemente, F.J.; Rodríguez-Triana, M.J.; Shankar, S.K.; Martínez Pérez, G. A Scalable Architecture for the Dynamic Deployment of Multimodal Learning Analytics Applications in Smart Classrooms. *Sensors* 2020, 20, 2923. <https://doi.org/10.3390/s20102923>
41. Wander Queiroz, Miriam A.M. Capretz, Mario Dantas. An approach for SDN traffic monitoring based on big data techniques, *Journal of Network and Computer Applications*, Vol. 131, 2019, P. 28-39. <https://doi.org/10.1016/j.jnca.2019.01.016>.
42. Alberto Huertas Celdrán, Manuel Gil Pérez, Félix J. García Clemente, Gregorio Martínez Pérez. Automatic monitoring management for 5G mobile networks, *Procedia Computer Science*, Vol. 110, 2017, P. 328-335. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2017.06.102>.
43. R. Khan, P. Kumar, D. N. K. Jayakody and M. Liyanage, "A Survey on Security and Privacy of 5G Technologies: Potential Solutions, Recent Advancements, and Future Directions," in *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol. 22, no. 1, pp. 196-248, Firstquarter 2020, doi: 10.1109/COMST.2019.2933899.
44. Raja Majid Ali Ujjan, Zeeshan Pervez, Keshav Dahal, Ali Kashif Bashir, Rao Mumtaz, J. González. Towards sFlow and adaptive polling sampling for deep learning based DDoS detection in SDN, *Future Generation Computer Systems*, Vol. 111, 2020, P. 7 779. <https://doi.org/10.1016/j.future.2019.10.015>.
45. Saksit Jantila, Kornchawal Chaipah. A Security Analysis of a Hybrid Mechanism to Defend DDoS Attacks in SDN, *Procedia Computer Science*, Vol. 86, 2016, P. 437-440. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2016.05.072>.
46. Ihsan H Abdulqadder, Shijie Zhou, Deqing Zou, Israa T. Aziz, Syed Muhammad Abrar Akber. Multi-layered intrusion detection and prevention in the SDN/NFV enabled cloud of 5G networks using AI-based defense mechanisms, *Computer Networks*, Vol. 179, 2020, 107364. <https://doi.org/10.1016/j.comnet.2020.107364>.
47. Yulong Fu, Zheng Yan, Hui Li, Xiao Long Xin, Jin Cao. A secure SDN based multi-RANs architecture for future 5G networks, *Computers & Security*, Vol. 70, 2017, P. 648-662. <https://doi.org/10.1016/j.cose.2017.08.013>.
48. Suzan Basloom, Nadine Akkari, Ghadah Aldabbagh. Reducing Handoff Delay in SDN-based 5G Networks Using AP Clustering, *Procedia Computer Science*, Vol. 163, 2019, P. 198-208. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2019.12.101>.
49. Farzad Tasharian, Alireza Erfanian, Amir Varasteh. S<sup>2</sup>VC: An SDN-based framework for maximizing QoE in SVC-based HTTP adaptive streaming, *Computer Networks*, Vol. 146, 2018, P. 33-46. <https://doi.org/10.1016/j.comnet.2018.09.007>
50. K. Tolga Bagci, A. Murat Tekalp. SDN-enabled distributed open exchange: Dynamic QoS-path optimization in multi-operator services, *Computer Networks*, Vol. 162, 2019, 106845. <https://doi.org/10.1016/j.comnet.2019.07.001>
51. Luis Tello-Oquendo, Shih-Chun Lin, Ian F. Akyildiz, Vicent Pla. Software-Defined architecture for QoS-Aware IoT deployments in 5G systems, *Ad Hoc Networks*, Vol. 93, 2019, 101911. <https://doi.org/10.1016/j.adhoc.2019.101911>.



## ANALYSIS OF MODERN STANDARD APPLICATION METHODS OF SOFTWARE-DEFINED NETWORK IN 5G/IMT-2020

**B. Daneshmand**, St. Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics, St. Petersburg, Russia

### Abstract

The paper considers the application of SDN technology in 5G / IMT-2020 networks, namely, answers to the questions: What is SDN technology used for in 5G / IMT-2020 networks; How is SDN technology used in 5G / IMT-2020 networks; What is the role of SDN technology in 5G / IMT-2020 networks; What are the functions of SDN technology in 5G / IMT-2020 networks etc. But before that, it describes what SDN is and what 5G / IMT-2020 is. The paper describes and analyzes the methods of using SDN technology in fifth generation networks in terms of the function and role that SDN plays in these networks. Usually in the literature, this information exists in a scattered form, and sometimes some methods of application are either very superficially described, or not described at all, or they are tied to other methods. The aim of the work is to identify and analyze well-established methods of using SDN in 5G / IMT-2020 networks. To identify SDN applications in 5G / IMT-2020 networks, SDN architecture, SDN benefits, overall 5G / IMT-2020 network architecture, 5G / IMT-2020 standards and requirements, network protocols were studied and analyzed 5G / IMT-2020, some existing and future likely 5G / IMT-2020 network services, general concepts of some future networks such as tactile internet, internet skills, model networks, etc. The paper provides a radial diagram of the ways (options) of using SDN in 5G / IMT-2020 and describes each option.

**Keywords:** 5G / IMT-2020, SDN, communication network, software-defined network, virtualization, use of SDN, SDN controller, network equipment, technology.

### References

1. Recommendation ITU-T Y.3101 "Requirements of the IMT-2020 network", 2018.
2. 3GPP TS 22.261 V16.5.0 "Service requirements for the 5G system", фаза 1, релиз 16, сентябрь 2018 г.
3. 3GPP TS 23.501 V15.0.0 "System Architecture for the 5G System", Release 15, 2018-09.
4. Abdelmoteleb Abdelhamid Ashraf Athea (2019). Research and development of methods for constructing communication networks of the fifth generation 5G, ensuring the fulfillment of the requirements of the concepts of the tactile Internet. SPbSUT named after Professor M. A. Bonch-Bruевич. Thesis. St. Petersburg.
5. A. S. Borodin (2019). Development and research of methods for constructing communication networks of the fifth generation. SPbSUT named after Professor M. A. Bonch-Bruевич. Thesis. Saint Petersburg.
6. Muhizi Samuel (2019). Development of models and methods of resource segmentation in software-defined networks. SPbSUT named after Professor M. A. Bonch-Bruевич. Thesis. Saint Petersburg.
7. E. V. Salomatina (2019). Development of models of telecommunication information and management networks and methods of their effective use. Scientific research institute of radio. Thesis. Moscow.
8. S. V. Galich (2018). Research and analysis of control traffic processing delay in software-defined networks. Volgograd state university. Thesis. Volgograd.
9. Javier Guillermo (2019). How 5G Relates to SDN and NFV Technologies - Part I: Introduction and History. DELL Technologies, 2019. [https://infocus.delltechnologies.com/javier\\_guillermo/how-5g-relates-to-sdn-and-nfv-technologies-part-i-introduction-and-history/](https://infocus.delltechnologies.com/javier_guillermo/how-5g-relates-to-sdn-and-nfv-technologies-part-i-introduction-and-history/) . (Дата обращения 23.08.2020)
10. Javier Guillermo (2019). How 5G Relates to SDN and NFV Technologies - Part II: Architecture. DELL Technologies, 2019 [https://infocus.delltechnologies.com/javier\\_guillermo/how-5g-relates-to-sdn-and-nfv-technologies-part-ii-architecture/](https://infocus.delltechnologies.com/javier_guillermo/how-5g-relates-to-sdn-and-nfv-technologies-part-ii-architecture/) . (Дата обращения 23.08.2020)
11. Javier Guillermo (2019). How 5G Relates to SDN and NFV Technologies - Part III: Architecture (Continued). DELL Technologies, 2019 [https://infocus.delltechnologies.com/javier\\_guillermo/how-5g-relates-to-sdn-and-nfv-technologies-part-iii-architecture-continued/](https://infocus.delltechnologies.com/javier_guillermo/how-5g-relates-to-sdn-and-nfv-technologies-part-iii-architecture-continued/) . (Дата обращения 23.08.2020)
12. Z. Zaidi, V. Friderikos, Z. Yousaf, S. Fletcher, M. Dohler and H. Aghvami (2018), "Will SDN Be Part of 5G?," in *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol. 20, no. 4, pp. 3220-3258, Fourthquarter 2018, doi: 10.1109/COMST.2018.2836315.
13. Massimo Condoluci, Toktam Mahmoodi (2018). Softwarization and virtualization in 5G mobile networks: Benefits, trends and challenges. *Computer Networks*, Vol. 146, 9 December 2018, P. 65-84. <https://doi.org/10.1016/j.comnet.2018.09.005>
14. A.A. Barakabitze, A.Ahmad, R. Mijumbi, A. Hines (2020). 5G network slicing using SDN and NFV: A survey of taxonomy, architectures and future challenges *Computer Networks*, Vol. 167, 11 February 2020. <https://doi.org/10.1016/j.comnet.2019.106984>
15. H. Zhang, N. Liu, X. Chu, K. Long, A. Aghvami and V. C. M. Leung (2017), "Network Slicing Based 5G and Future Mobile Networks: Mobility, Resource Management, and Challenges," in *IEEE Communications Magazine*, vol. 55, no. 8, pp. 138-145, Aug. 2017, doi: 10.1109/MCOM.2017.1600940.
16. Long, Q., Chen, Y., Zhang, H. et al. Software Defined 5G and 6G Networks: a Survey. *Mobile Netw Appl* (2019). SpringerLink. <https://doi.org/10.1007/s11036-019-01397-2>
17. A. Pradhan, R. Mathew (2020). Solutions to Vulnerabilities and Threats in Software Defined Networking (SDN). *Procedia Computer Science*, Vol. 171. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2020.04.280>.
18. S. Shahryari, S.-A. Hosseini-Seno, F. Tashtarian (2020), An SDN based framework for maximizing throughput and balanced load distribution in a Cloudlet network. *Future Generation Computer Systems*, Vol. 110, September 2020. <https://doi.org/10.1016/j.future.2020.04.009>
19. H. Zhou et al. (2018), "SDN-RDCD: A Real-Time and Reliable Method for Detecting Compromised SDN Devices," in *IEEE/ACM Transactions on Networking*, vol. 26, no. 5, pp. 2048-2061, Oct. 2018, doi: 10.1109/TNET.2018.2859483 .
20. A. Binsahaq, T. R. Sheltami and K. Salah (2019), "A Survey on Autonomic Provisioning and Management of QoS in SDN Networks," in *IEEE Access*, vol. 7, pp. 73384-73435, 2019, doi: 10.1109/ACCESS.2019.2919957.
21. Shahram Jamali, Amin Badirzadeh, Mina Soltani Siapoush (2019). On the use of the genetic programming for balanced load distribution in software-defined networks, *Digital Communications and Networks*, Vol. 5, Issue 4. P. 288-296. <https://doi.org/10.1016/j.dcan.2019.10.002> .
22. Sandhya, Yash Sinha, K. Haribabu (2017). A survey: Hybrid SDN, *Journal of Network and Computer Applications*, Vol. 100. P. 35-55. <https://doi.org/10.1016/j.jnca.2017.10.003>.
23. Sibylle Schaller, Dave Hood (2017). Software defined networking architecture standardization, *Computer Standards & Interfaces*, Vol. 54, Part 4, P. 197-202. <https://doi.org/10.1016/j.csi.2017.01.005>.

24. Bego Blanco, Jose Oscar Fajardo, Ioannis Giannoulakis, Emmanouil Kafetzakis, Shuping Peng, Jordi Perez-Romero, Irena Trajkovska, Pouria S. Khodashenas, Leonardo Goratti, Michele Paolino, Evangelos Sfakianakis, Fidel Liberal, George Xilouris (2017). Technology pillars in the architecture of future 5G mobile networks: NFV, MEC and SDN, *Computer Standards & Interfaces*, Vol. 54, Part 4, P. 216-228. <https://doi.org/10.1016/j.csi.2016.12.007>
25. Pedro Neves, Rui Cale, Mario Costa, Gonsalo Gaspar, Jose Alcaraz-Calero, Qi Wang, James Nightingale, Giacomo Bernini, Gino Carrozzo, Angel Valdivieso, Luis Javier Garcia Villalba, Maria Barros, Anastasius Gravas, Jose Santos, Ricardo Maia, Ricardo Preto (2017). Future mode of operations for 5G - The SELFNET approach enabled by SDN/NFV, *Computer Standards & Interfaces*, Vol. 54, Part 4, P. 229-246. <https://doi.org/10.1016/j.csi.2016.12.008>
26. Sudha Anbalagan, Dhananjay Kumar, Gunasekaran Raja, Alkondan Balaji (2019). SDN assisted Stackelberg Game model for LTE-WiFi offloading in 5G networks, *Digital Communications and Networks*, Vol. 5, Issue 4, P. 268-275. <https://doi.org/10.1016/j.dcan.2019.10.006>
27. Anshu Bhardwaj (2020). 5G for Military Communications, *Procedia Computer Science*, Vol. 171, P. 2665-2674. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2020.04.289>
28. Fernando Zanferrari Morais, Cristiano Andre da Costa, Antonio Marcos Alberti, Cristiano Bonato Both, Rodrigo da Rosa Righi (2020). When SDN meets C-RAN: A survey exploring multi-point coordination, interference, and performance, *Journal of Network and Computer Applications*, Vol. 162, 102655. <https://doi.org/10.1016/j.jnca.2020.102655>
29. E. Schiller, N. Nikaein, E. Kalogiton, M. Gasparyan, T. Braun (2018). CDS-MEC: NFV/SDN-based Application Management for MEC in 5G Systems, *Computer Networks*, Vol. 135, P. 96-107. <https://doi.org/10.1016/j.comnet.2018.02.013>
30. Ian F. Akyildiz, Shih-Chun Lin, Pu Wang (2015). Wireless software-defined networks (W-SDNs) and network function virtualization (NFV) for 5G cellular systems: An overview and qualitative evaluation, *Computer Networks*, Vol. 93, Part 1, P. 66-79. <https://doi.org/10.1016/j.comnet.2015.10.013>
31. Junseok Kim, Dongmyoung Kim, Sunghyun Choi (2017). 3GPP SA2 architecture and functions for 5G mobile communication system, *ICT Express*, Vol. 3, Issue 1, P. 1-8. <https://doi.org/10.1016/j.icte.2017.03.007>
32. Guido Maier, Martin Reisslein. Transport SDN at the dawn of the 5G era, *Optical Switching and Networking*, Volume 33, 2019, Pages 34-40. <https://doi.org/10.1016/j.osn.2019.02.001>
33. Bo Yi, Xingwei Wang, Keqin Li, Sajal k. Das, Min Huang (2018). A comprehensive survey of Network Function Virtualization, *Computer Networks*, Vol. 133, P. 212-262. <https://doi.org/10.1016/j.comnet.2018.01.021>
34. L. Atzori, J.L. Bellido, R. Bolla, G. Genovese, A. Iera, A. Jara, C. Lombardo, G. Morabito (2019). SDN&NFV contribution to IoT objects virtualization, *Computer Networks*, Vol. 149, P. 200-212. <https://doi.org/10.1016/j.comnet.2018.11.030>
35. Muhammad Afaq, Javed Iqbal, Talha Ahmed, Ihtesham Ul Islam, Murad Khan, Muhammad Sohail Khan (2020). Towards 5G network slicing for vehicular ad-hoc networks: An end-to-end approach, *Computer Communications*, Vol. 149, P. 252-258. <https://doi.org/10.1016/j.comcom.2019.10.018>
36. Sokratis Barmounakis, Nikolaos Maroulis, Michael Papadakis, George Tsiatsios, Dimitrios Soukaras, Nancy Alonistioti (2020). Network slicing - enabled RAN management for 5G: Cross layer control based on SDN and SDR, *Computer Networks*, Vol. 166, 106987. <https://doi.org/10.1016/j.comnet.2019.106987>
37. Slamnik-Krije?torac, N.; de Britto e Silva, E.; Municio, E.; Carvalho de Resende, H.C.; Hadiwardoyo, S.A.; Marquez-Barja, J.M. (2020). Network Service and Resource Orchestration: A Feature and Performance Analysis within the MEC-Enhanced Vehicular Network Context. *Sensors*, 20, 3852. <https://doi.org/10.3390/s20143852>
38. Charalampos Rotsos, Daniel King, Arsham Farshad, Jamie Bird, Lyndon Fawcett, Nektarios Georgalas, Matthias Gunkel, Kohei Shiimoto, Aijun Wang, Andreas Mauthe, Nicholas Race, David Hutchison (2017). Network service orchestration standardization: A technology survey, *Computer Standards & Interfaces*, Vol. 54, Part 4, P. 203-215. <https://doi.org/10.1016/j.csi.2016.12.006>
39. Luis M. Vaquero, Felix Cuadrado, Yehia Elkhatib, Jorge Bernal-Bernabe, Satish N. Srirama, Mohamed Faten Zhani (2019). Research challenges in nextgen service orchestration, *Future Generation Computer Systems*, Vol. 90, P. 20-38. <https://doi.org/10.1016/j.future.2018.07.039>
40. Huertas Celdren, A.; Ruiperez-Valiente, J.A.; Garcia Clemente, F.J.; Rodriguez-Triana, M.J.; Shankar, S.K.; Martinez Perez, G. (2020). A Scalable Architecture for the Dynamic Deployment of Multimodal Learning Analytics Applications in Smart Classrooms. *Sensors*, 20, 2923. <https://doi.org/10.3390/s20102923>
41. Wander Queiroz, Miriam A.M. Capretz, Mario Dantas (2019). An approach for SDN traffic monitoring based on big data techniques, *Journal of Network and Computer Applications*, Vol. 131, P. 28-39. <https://doi.org/10.1016/j.jnca.2019.01.016>
42. Alberto Huertas Celdren, Manuel Gil Perez, Felix J. Garcia Clemente, Gregorio Martinez Perez (2017). Automatic monitoring management for 5G mobile networks, *Procedia Computer Science*, Vol. 110, P. 328-335. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2017.06.102>
43. R. Khan, P. Kumar, D. N. K. Jayakody and M. Liyanage (2020), "A Survey on Security and Privacy of 5G Technologies: Potential Solutions, Recent Advancements, and Future Directions," in *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol. 22, no. 1, pp. 196-248, Firstquarter 2020, doi: 10.1109/COMST.2019.2933899.
44. Raja Majid Ali Ujjan, Zeeshan Pervez, Keshav Dahal, Ali Kashif Bashir, Rao Mumtaz, J. Gonzalez (2020). Towards sFlow and adaptive polling sampling for deep learning based DDoS detection in SDN, *Future Generation Computer Systems*, Vol. 111, P. 763-779. <https://doi.org/10.1016/j.future.2019.10.015>
45. Saksit Jantila, Kornchawal Chaipah (2016). A Security Analysis of a Hybrid Mechanism to Defend DDoS Attacks in SDN, *Procedia Computer Science*, Vol. 86, P. 437-440. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2016.05.072>
46. Ihsan H Abdulqadder, Shijie Zhou, Deqing Zou, Israa T. Aziz, Syed Muhammad Abrar Akber (2020). Multi-layered intrusion detection and prevention in the SDN/NFV enabled cloud of 5G networks using AI-based defense mechanisms, *Computer Networks*, Vol. 179, 107364. <https://doi.org/10.1016/j.comnet.2020.107364>
47. Yulong Fu, Zheng Yan, Hui Li, Xiao Long Xin, Jin Cao (2017). A secure SDN based multi-RANs architecture for future 5G networks, *Computers & Security*, Vol. 70, P. 648-662. <https://doi.org/10.1016/j.cose.2017.08.013>
48. Suzan Basloom, Nadine Akkari, Ghadah Aldabbagh (2019). Reducing Handoff Delay in SDN-based 5G Networks Using AP Clustering, *Procedia Computer Science*, Vol. 163, P. 198-208. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2019.12.101>
49. Farzad Tashtarian, Alireza Erfanian, Amir Varasteh (2018). S2VC: An SDN-based framework for maximizing QoE in SVC-based HTTP adaptive streaming, *Computer Networks*, Vol. 146, P. 33-46. <https://doi.org/10.1016/j.comnet.2018.09.007>
50. K. Tolga Bagci, A. Murat Tekalp (2019). SDN-enabled distributed open exchange: Dynamic QoS-path optimization in multi-operator services, *Computer Networks*, Vol. 162, 106845. <https://doi.org/10.1016/j.comnet.2019.07.001>
51. Luis Tello-Oquendo, Shih-Chun Lin, Ian F. Akyildiz, Vicent Pla (2019). Software-Defined architecture for QoS-Aware IoT deployments in 5G systems, *Ad Hoc Networks*, Vol. 93, 101911. <https://doi.org/10.1016/j.adhoc.2019.101911>

#### Information about author:

**Behrooz Daneshmand**, postgraduate student of the St. Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Faculty of infocommunication technologies, St. Petersburg, Russia