ФРЕЙМВОРК УПРАВЛЕНИЯ SLA ДЛЯ СОВРЕМЕННЫХ ТЕЛЕКОММУНИКАЦИОННЫХ СЕТЕЙ: РЕАЛИЗАЦИЯ И АНАЛИЗ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ В КОНТЕКСТЕ УЗБЕКИСТАНА

Гузаль Саиткамолова

докторант, Ташкентский университет информационных технологий (ТУИТ)

Abstract. This paper presents a comprehensive SLA management framework adapted for Uzbek telecom operators and meeting the specific requirements outlined in the Digital Uzbekistan 2030 strategy. A comprehensive review of modern approaches to SLA implementation is provided, including an analysis of SDN/NFV-based network slicing, machine learning-based SLA prediction and guarantee mechanisms, and autonomous intent-driven management systems. The framework provides telecom operators with practical recommendations for implementing modern SLA management practices, taking into account the unique challenges of emerging markets. This work contributes to the development of QoS assurance methodologies in the telecommunications infrastructure of Central Asia.

Keywords: service level agreement, quality of service, telecommunication networks, SLA management, network monitoring, 5G networks, SDN/NFV, Digital Uzbekistan 2030

Аннотация. В данной статье представлен комплексный фреймворк управления SLA, адаптированный для телекоммуникационных операторов Узбекистана и отвечающий специфическим требованиям, изложенным в стратегии «Цифровой Узбекистан 2030». Проведен обширный обзор современных подходов к реализации SLA, включающий анализ сетевого слайсинга на базе SDN/NFV, механизмов прогнозирования и гарантирования SLA на основе машинного обучения, а также автономных систем управления на основе намерений (intent-driven management). Фреймворк предоставляет телекоммуникационным операторам практические рекомендации по внедрению современных практик управления SLA с учетом уникальных вызовов развивающихся рынков. Данная работа вносит вклад в развитие методологий обеспечения QoS в инфраструктуре телекоммуникаций Центральной Азии.

Ключевые слова: соглашение об уровне обслуживания, качество обслуживания, телекоммуникационные сети, управление SLA, мониторинг сети, сети 5G, SDN/NFV, Цифровой Узбекистан 2030

Annotatsiya. Ushbu hujjatda O'zbekiston aloqa operatorlari uchun moslashtirilgan va Digital Uzbekistan 2030 strategiyasida belgilangan talablarga javob beradigan SLA menejmentining keng qamrovli asoslari keltirilgan. SLA'NI amalga oshirishning zamonaviy yondashuvlarini har tomonlama ko'rib chiqish, shu

ISSN 3030-3907

jumladan SDN/NFV asosidagi tarmoqni kesish, mashinalarni o'rganishga asoslangan SLA'NI bashorat qilish va kafolatlash mexanizmlari va avtonom niyatga asoslangan boshqaruv tizimlarini tahlil qilish. Ushbu ramka aloqa operatorlariga rivojlanayotgan bozorlarning o'ziga xos muammolarini hisobga olgan holda zamonaviy SLA boshqaruv amaliyotini joriy etish bo'yicha amaliy tavsiyalar beradi. Ushbu ish Markaziy Osiyo telekommunikatsiya infratuzilmasida Qosni ta'minlash metodologiyasini rivojlantirishga yordam beradi.

Kalit so'zlar: xizmat ko'rsatish darajasi shartnomasi, xizmat ko'rsatish sifati, telekommunikatsiya tarmoqlari, SLA boshqaruvi, tarmoq monitoringi, 5G tarmoqlari, SDN/ NFV, Digital Uzbekistan 2030

Введение

Телекоммуникационная индустрия претерпела фундаментальные изменения с развертыванием сетей пятого поколения (5G), облачных архитектур и программно-определяемой инфраструктуры. Эти технологические достижения создали беспрецедентные возможности для инноваций в области услуг, одновременно порождая сложные проблемы в обеспечении и управлении качеством обслуживания (QoS). Соглашения об уровне обслуживания (SLA) стали основным договорным механизмом, с помощью которого поставщики телекоммуникационных услуг гарантируют определенные уровни производительности своим клиентам, включая такие параметры, как доступность, задержка, пропускная способность, потеря пакетов и джиттер. В контексте развивающихся телекоммуникационных рынков, особенно в Центральной Азии, эффективное внедрение фреймворков управления SLA сталкивается с особыми вызовами. Телекоммуникационный сектор Узбекистана переживает период быстрой модернизации, обусловленный национальной стратегией «Цифровой Узбекистан 2030», которая подчеркивает развитие передовой телекоммуникационной инфраструктуры, повышение качества цифровых услуг и интеграцию с международными телекоммуникационными стандартами. Эта модернизационная инициатива требует принятия сложных практик управления SLA, которые могут учитывать как международные лучшие практики, так и местные операционные реалии.

Появление программно-конфигурируемых сетей (SDN) и виртуализации сетевых функций (NFV) радикально изменило операционную парадигму, обеспечивая программируемую инфраструктуру и автоматизированное предоставление услуг, одновременно создавая новые сложности в мониторинге производительности и проверке соответствия SLA.

Данная статья вносит следующий вклад в область управления SLA в телекоммуникациях:

ISSN 3030-3907

1. Комплексный обзор и синтез современной литературы по управлению SLA, охватывающий недавние достижения в области сетевого слайсинга на основе SDN/NFV, прогнозирования и гарантирования SLA на основе машинного обучения, автономных систем управления и подходов на основе намерений (intent-driven networking).
2. Систематический фреймворк управления SLA, специально разработанный для телекоммуникационных операторов Узбекистана, интегрирующий международные лучшие практики с требованиями стратегии «Цифровой Узбекистан 2030» и особенностями местной инфраструктуры.
3. Экспериментальная валидация через практическую реализацию с использованием возможностей Cisco IOS IP SLA, демонстрирующая отслеживание доступности, механизмы управления маршрутизацией и оценку качества обслуживания в реальном времени через операции UDP jitter.
4. Практические рекомендации по внедрению и руководства для телекоммуникационных операторов, стремящихся установить или усовершенствовать свои возможности управления SLA в контексте современных сетевых архитектур.

Обзор литературы и связанных работ

Управление соглашениями об уровне обслуживания в телекоммуникационных сетях было предметом обширных исследований, особенно после появления сетей 5G и программно-определяемой инфраструктуры. В данном разделе рассматривается современная литература, организованная по нескольким тематическим областям: фундаментальные обзоры сетевого слайсинга на основе SDN/NFV, подходы машинного обучения для управления SLA, автономные системы на основе намерений и практические фреймворки реализации. Баракабитзе и др. [1] представили комплексный обзор сетевого слайсинга 5G с использованием технологий SDN и NFV. Их работа рассматривает, как SDN-контроллеры поддерживают распределение ресурсов в соответствии с установленными SLA в многодоменных средах, изучая фреймворк ETSI NFV-MANO и оркестраторы с открытым исходным кодом (ONAP, OSM, CORD). Джалалиан и др. [5] расширили эту основу, предложив модель целочисленного линейного программирования для слайсинга ядра сети 5G с совместным использованием VNF между слайсами для минимизации затрат. Их алгоритм HBA-NS распределяет ресурсы с учетом ограничений SLA, включая требования к задержке, а модель CNN-LSTM предсказывает запросы для динамического масштабирования. Чергуи и Верикукис [2] представили подход к предоставлению ресурсов для динамического слайсинга в сетях 5G

ISSN 3030-3907

на базе SDN/NFV. Их работа использует предиктор трафика на основе GRU, обученный на данных реальной сотовой сети, и глубокие нейронные сети для оценки требуемых ресурсов при поддержании SLA на основе частоты нарушений и границ ресурсов. Жанг и др. [4] предложили динамический фреймворк слайсинга радио ресурсов, использующий глубокое обучение с подкреплением с распределенными и централизованными агентами для максимизации повторного использования спектра при гарантии требований SLA. Маруодис и др. [6] исследовали прогнозирование нарушений SLA, демонстрируя, что графовые нейронные сети эффективно захватывают отношения между сетевыми сущностями. Куреши и др. [3] предоставили комплексный фреймворк, выявляя вызовы на всех этапах жизненного цикла SLA для 5G. Их систематическая таксономия включает SLA на основе клиентов, сервисов, слайсов и динамические SLA, а также фреймворки для отображения KPI высокого уровня на параметры сети. Мехмуд и др. [7] исследовали сети на основе намерений (IBN) и их взаимодействие с NFV/SDN, предлагая архитектурный фреймворк для обеспечения соответствия SLO с интеграцией ETSI ZSM и ENI. Шарма и др. [8] предоставили таксономию управления SLA в системах на основе намерений для автоматизации с нулевым касанием, охватывая согласование намерений, предотвращение нарушений и интеграцию с SDN/NFV.

Анализ пробелов. Рассмотренная литература выявляет, что интеграция машинного обучения стала необходимой для проактивного управления SLA, много доменная оркестрация представляет наибольший вызов, а операции на основе намерений представляют будущее направление. Однако существует значительный пробел в практических фреймворках для операторов на развивающихся рынках, которые должны балансировать международные практики с местными ограничениями инфраструктуры.

Методология исследования

Предложенный фреймворк интегрирует международные лучшие практики с требованиями стратегии «Цифровой Узбекистан 2030» [14] и практическими соображениями развивающихся телекоммуникационных рынков.

Архитектура фреймворка состоит из пяти интегрированных компонентов, функционирующих в конфигурации с замкнутым циклом:

1. Спецификация и согласование SLA — определяет параметры сервиса, цели производительности и методологии измерения в соответствии с рекомендациями ITU-T [9, 10] и стандартами ETSI NFV [11].

ISSN 3030-3907

2. Мониторинг и измерение — реализует непрерывный сбор данных о производительности, используя активные методы (Cisco IOS IP SLA) и пассивный мониторинг через анализ потоков.
3. Анализ соответствия SLA — корреляция измерений с целями SLA и обнаружение нарушений.
4. Реагирование на нарушения — автоматизированные механизмы исправления, включая динамическую маршрутизацию и перераспределение ресурсов.
5. Отчетность и улучшение — генерация отчетов о соответствии SLA и идентификация областей для оптимизации.

Фреймворк специально адресует цели стратегии «Цифровой Узбекистан 2030» [14] через включение международных стандартов (ITU-T, ETSI, 3GPP [15]), учет приоритетных сервисов (электронное правительство, здравоохранение, образование) и поддержку постепенного технологического развития с гибридными архитектурами.

Следуя таксономии TeleManagement Forum [12], параметры SLA классифицируются на: (1) технологически независимые (доступность, MTBF, MTTR, время предоставления); (2) технологически специфические (для IP: потеря пакетов, задержка, джиттер; для мобильных: успешность установления вызова, хендовер); (3) сервис-специфические (для голоса: MOS, завершение вызовов; для видео: качество, буферизация; для данных: пропускная способность, время отклика).

Лабораторная топология и конфигурация сети

Экспериментальная топология состоит из трех маршрутизаторов Cisco, настроенных для имитации филиала с двойным подключением к интернет-провайдерам. Маршрутизатор R1 представляет филиал, подключенный к двум ISP, обозначенным как ISP1 и ISP2. ISP1 служит предпочтительным подключением к Интернету, в то время как ISP2 обеспечивает резервный канал. Оба ISP могут взаимодействовать и достигать имитированных веб-серверов, создавая резервную топологию, которая позволяет тестировать сценарии отказоустойчивости и механизмы управления маршрутизацией.

Конфигурация маршрутизатора R1 включает интерфейс loopback (Loopback 0) с IP-адресом 192.168.1.1/24, представляющий локальную сеть филиала, и два последовательных интерфейса, подключающихся к ISP1 (209.165.201.2/30) и ISP2 (209.165.202.130/30) соответственно. Конфигурация маршрутизатора ISP1 включает интерфейс loopback, имитирующий интернет-веб-сервер (209.165.200.254/32), интерфейс loopback, представляющий DNS-сервер ISP1 (209.165.201.30/32), и последовательные интерфейсы, подключающиеся к R1 и ISP2.

ISSN 3030-3907

Маршрутизатор ISP2 настроен аналогично с собственным имитированным веб-сервером и DNS-сервером. Протокол маршрутизации EIGRP настроен между ISP1 и ISP2 для анонсирования их соответствующих пулов публичных адресов, в то время как статические маршруты настроены для достижимости локальной сети филиала.

Отслеживание доступности IP SLA и управление маршрутизацией

Первый экспериментальный сценарий реализует отслеживание доступности и автоматическое управление маршрутизацией для обеспечения непрерывной связи с Интернетом несмотря на сбои ISP. Этот сценарий адресует распространенную операционную задачу, когда канал к ISP остается операционально активным, но пользователи не могут подключиться к интернет-ресурсам из-за проблем с ISP или ниже по потоку от их сети. Традиционная статическая маршрутизация не может обнаружить и отреагировать на такие сбои, поскольку локальный интерфейс остается операционным.

Реализация использует зонды Cisco IOS IP SLA для непрерывного мониторинга связи с DNS-сервером ISP1. Зонд настроен как операция ICMP echo, нацеленная на IP-адрес DNS-сервера ISP1 (209.165.201.30) с частотой 10 секунд. Конфигурация зонда включает параметры времени жизни, установленные на бесконечную работу, начиная немедленно после конфигурации. Объект отслеживания (track 1) связан с зондом IP SLA, отслеживая доступность DNS-сервера. Объект отслеживания включает параметры задержки для предотвращения колебаний маршрута: 10 секунд задержки вниз и 1 секунда задержки вверх. Эти параметры обеспечивают, что временные сетевые колебания не вызывают ненужных изменений маршрута.

Механизм управления маршрутизацией реализован через плавающие статические маршруты с различными административными расстояниями. Первичный маршрут по умолчанию к ISP1 настроен с административным расстоянием 2 и связан с объектом отслеживания 1. Резервный маршрут по умолчанию к ISP2 настроен с административным расстоянием 3. Когда объект отслеживания обнаруживает, что DNS-сервер ISP1 достижим, первичный маршрут остается активным в таблице маршрутизации из-за его более низкого административного расстояния. При обнаружении недоступности DNS-сервера объект отслеживания переходит в состояние down, вызывая удаление первичного маршрута протоколом маршрутизации и установку резервного маршрута к ISP2. Второй зонд IP SLA (операция 22) настроен для мониторинга DNS-сервера ISP2, обеспечивая резервирование в самой системе мониторинга. Этот зонд следует той же схеме конфигурации, что и первичный зонд, но нацелен на адрес DNS-сервера ISP2

ISSN 3030-3907

(209.165.202.158) и связан с отдельным объектом отслеживания (track 2). Связанный плавающий статический маршрут к ISP2 настроен с административным расстоянием 3, обеспечивая его активацию только когда как первичный путь ISP1, так и система мониторинга ISP1 отказали.

Операции UDP Jitter для оценки качества обслуживания в реальном времени

Второй экспериментальный сценарий реализует операции UDP jitter для оценки пригодности сети для приложений реального времени, таких как Voice over IP (VoIP) и видеоконференции. Джиттер, определяемый как межпакетная вариация задержки, является критической метрикой качества для сервисов реального времени. Когда пакеты передаются с регулярными интервалами, вариации в сетевой задержке приводят к тому, что пакеты прибывают с нерегулярным интервалом, ухудшая качество приложений реального времени. Положительные значения джиттера указывают на то, что пакеты прибывают позже ожидаемого, в то время как отрицательные значения джиттера указывают на более раннее прибытие. Для чувствительных к задержке приложений последовательный низкий джиттер необходим для приемлемого пользовательского опыта.

Операция UDP jitter IP SLA генерирует синтетический UDP-трафик для одновременного измерения нескольких параметров производительности. Каждая операция jitter отправляет настраиваемое количество UDP-пакетов с указанными интервалами на целевое назначение. Операция измеряет джиттер по направлениям (от источника к назначению и от назначения к источнику), потерю пакетов по направлениям, задержку по направлениям (односторонняя задержка) и задержку туда-обратно. Эти измерения позволяют идентифицировать асимметричные проблемы производительности, которые распространены в современных сетях, где прямой и обратный пути могут проходить через различные сетевые сегменты.

В нашей реализации операция UDP jitter 33 настроена на отправку 1000 пакетов с 10-байтовой нагрузкой с интервалами 30 миллисекунд на ответчик ISP1 на UDP-порт 5000. Исходный адрес настроен как адрес локальной сети филиала R1 (209.165.201.2) с использованием исходного порта 7000. Операция повторяется каждые 30 секунд, обеспечивая непрерывную оценку качества. Параллельная операция jitter 44 отслеживает путь к ISP2, обеспечивая сравнительный анализ качества обслуживания в обоих соединениях ISP. Обе операции связаны с объектами отслеживания, которые могут инициировать изменения пути, если метрики джиттера, потери пакетов или задержки превышают приемлемые пороги, определенные в SLA.

ISSN 3030-3907

Результаты измерения джиттера предоставляют комплексное понимание поведения сети. В дополнение к значениям джиттера операция сообщает о положительных и отрицательных вхождениях джиттера отдельно, позволяя идентифицировать направленное смещение в вариации задержки. Измерения потери пакетов различают потерю пакетов от источника к назначению и от назначения к источнику, обеспечивая точную локализацию ухудшения качества. Измерения односторонней задержки выявляют асимметричную маршрутизацию или задержки обработки, которые могут быть не очевидны из измерений туда-обратно. Эти детальные данные о производительности поддерживают сложную проверку соответствия SLA и обеспечивают проактивное управление качеством для сервисов реального времени.

Экспериментальные результаты и анализ производительности

Результаты отслеживания доступности и управления маршрутизацией

Эксперимент по отслеживанию доступности был проведен в три фазы: нормальная работа с доступным ISP1, имитированный сбой ISP1 и восстановление ISP1. В фазе нормальной работы операция IP SLA 11 (мониторинг DNS-сервера ISP1) генерировала успешные ответы ICMP echo каждые 10 секунд. Статистика операции показала 26 успешных зондов с нулевыми сбоями. Одновременно операция IP SLA 22 (мониторинг DNS-сервера ISP2) также работала успешно с 35 успешными зондами, подтверждая, что оба пути были операционными и отслеживались одновременно.

Во время имитации сбоя ISP1, осуществленной путем административного выключения интерфейса loopback DNS-сервера ISP1, операция IP SLA 11 начала обнаруживать сбои. Статистика операции перешла из состояния успеха в состояние сбоя, при этом последний код возврата изменился на «Нет соединения». После настроенной 10-секундной задержки вниз объект отслеживания 1 перешел из состояния up в состояние down, инициируя удаление первичного маршрута по умолчанию с административным расстоянием 2. Протокол маршрутизации автоматически установил резервный маршрут по умолчанию к ISP2 с административным расстоянием 3, завершив переключение примерно за 11 секунд от первоначального обнаружения сбоя.

При восстановлении сервиса ISP1, достигнутом путем повторного включения интерфейса loopback DNS-сервера ISP1, операция IP SLA 11 возобновила успешное зондирование. После настроенной 1-секундной задержки вверх объект отслеживания 1 перешел в состояние up, вызывая

ISSN 3030-3907

переустановку протоколом маршрутизации первичного маршрута по умолчанию к ISP1 с предпочтительным административным расстоянием 2. Таблица маршрутизации вернулась к своей исходной конфигурации с ISP1 в качестве первичного пути. Окончательная статистика показала операцию IP SLA 11 со 123 общими успешными зондами и 31 сбоем, накопленным во время имитированного сбоя, в то время как операция 22 поддерживала 124 успешных зонда с минимальными сбоями.

Операции UDP Jitter и метрики качества обслуживания

Результаты операций UDP jitter предоставляют детальную характеристику производительности для оценки качества сервисов реального времени. Операция IP SLA 33, отслеживающая путь к ISP1, передавала 1000 пакетов на итерацию с интервалами 30 миллисекунд. Операция записала комплексную статистику, включая джиттер от источника к назначению, джиттер от назначения к источнику, потерю пакетов в обоих направлениях, односторонние задержки и время туда-обратно. При нормальных условиях сети с минимальной перегрузкой операция сообщила о низких значениях джиттера, обычно ниже 5 миллисекунд, с симметричной производительностью в обоих направлениях.

Измерения джиттера от источника к назначению показали средние значения 2.3 миллисекунды со стандартным отклонением 1.1 миллисекунды, указывая на стабильное поведение сети, подходящее для приложений VoIP и видео. Джиттер от назначения к источнику продемонстрировал немного более высокую вариабельность со средними значениями 3.1 миллисекунды и стандартным отклонением 1.8 миллисекунды, предполагая некоторую асимметрию в характеристиках сетевого пути. Эта асимметрия распространена в сетях интернет-провайдеров, где прямой и обратный пути могут проходить через различные политики маршрутизации или механизмы управления перегрузкой.

Измерения потери пакетов выявили отличное качество сети с коэффициентами потерь ниже 0.1 процента в обоих направлениях во время нормальной работы. Потеря пакетов от источника к назначению составила в среднем 0.05 процента, в то время как потеря пакетов от назначения к источнику составила в среднем 0.08 процента. Эти значения находятся в пределах приемлемых порогов для приложений реального времени, которые обычно требуют потери пакетов ниже 1 процента для приемлемого качества VoIP и ниже 0.5 процента для видеоконференций высокой четкости.

Сравнительный анализ между операциями IP SLA 33 (путь ISP1) и 44 (путь ISP2) выявил различия в производительности между двумя поставщиками услуг. Путь ISP2 продемонстрировал немного более высокий

ISSN 3030-3907

средний джиттер (4.2 миллисекунды) и потерю пакетов (0.15 процента), хотя все еще в пределах приемлемых диапазонов. Односторонние задержки были сопоставимы между провайдерами, предполагая схожую длину путей маршрутизации. Эти измерения обеспечивают обоснованные решения о выборе первичного и резервного пути, политиках инженерии трафика и проверке соответствия SLA для конфигураций сетей с несколькими подключениями.

Обсуждение результатов и практические выводы

Экспериментальные результаты демонстрируют несколько важных выводов, относящихся к практической реализации управления SLA. Во-первых, активный мониторинг через зонды IP SLA обеспечивает надежное обнаружение проблем с доступностью сервисов, включая ситуации, когда сетевое подключение существует на физическом уровне, но сквозная достижимость сервиса нарушена. Эта возможность необходима для проверки соответствия SLA, поскольку традиционный мониторинг состояния интерфейса сам по себе не может обнаружить многие распространенные сценарии сбоев, такие как проблемы с вышестоящим провайдером, сбои DNS-сервера или проблемы маршрутизации.

Во-вторых, автоматический механизм управления маршрутизацией демонстрирует эффективное исправление нарушений SLA с минимальным прерыванием сервиса. Время переключения в 11 секунд от ISP1 к ISP2, включая настроенную 10-секундную задержку вниз, представляет значительное улучшение по сравнению с ручным вмешательством, которое может потребовать минут или часов для обнаружения и решения. Настраиваемые параметры задержки позволяют операторам балансировать между быстрым реагированием на реальные сбои и стабильностью в присутствии переходных сетевых колебаний.

В-третьих, результаты операций UDP jitter иллюстрируют ценность комплексного мониторинга производительности за пределами простых метрик доступности. Детальные измерения джиттера, потери пакетов и задержки обеспечивают проактивное управление качеством, позволяя операторам идентифицировать возникающие проблемы производительности до того, как они вызовут широкомасштабную деградацию сервиса или нарушения SLA. Измерения по направлениям особенно ценны для диагностики асимметричных сетевых проблем и оптимизации двунаправленных приложений.

Экспериментальная реализация с использованием стандартных возможностей Cisco IOS демонстрирует, что сложные возможности управления SLA доступны телекоммуникационным операторам без

ISSN 3030-3907

необходимости дорогостоящего специализированного оборудования или сложного пользовательского программного обеспечения. Эта доступность особенно актуальна для операторов на развивающихся рынках, которые должны балансировать инвестиции в передовые системы управления с ограниченными бюджетами и операционными ресурсами. Методы, продемонстрированные в данном исследовании, могут быть развернуты инкрементально, начиная с базового мониторинга доступности и постепенно добавляя более сложную оценку качества по мере созревания экспертизы и инфраструктуры оператора.

Заключение

Данная статья представила комплексный фреймворк управления SLA для современных телекоммуникационных сетей с конкретным применением к требованиям телекоммуникационных операторов Узбекистана. Через обширный обзор современной литературы мы синтезировали текущие лучшие практики в управлении SLA, охватывающие сетевой слайсинг на основе SDN/NFV, подходы на основе машинного обучения и автономные системы управления на основе намерений. Предложенный фреймворк интегрирует эти международные лучшие практики с конкретными требованиями стратегии «Цифровой Узбекистан 2030» и практическими ограничениями телекоммуникационных операторов на развивающихся рынках.

Экспериментальная валидация через реализацию возможностей Cisco IOS IP SLA продемонстрировала практическую эффективность подходов активного мониторинга для проверки соответствия SLA. Эксперименты по отслеживанию доступности показали надежное обнаружение сбоев сервиса и автоматическое управление маршрутизацией со временем переключения менее 12 секунд. Операции UDP jitter обеспечили комплексную оценку качества, подходящую для управления сервисами реального времени, с измерениями джиттера, потери пакетов, задержки и других критических параметров. Эти результаты подтверждают, что сложные возможности управления SLA достижимы с использованием широкодоступных возможностей сетевого оборудования, делая подход доступным для операторов с различными уровнями зрелости инфраструктуры.

Основные вклады данной работы включают систематический обзор современной литературы по управлению SLA, организованный по техническим подходам, комплексный фреймворк, специально разработанный для телекоммуникационных операторов Узбекистана с соответствием национальным стратегиям развития, экспериментальную валидацию, демонстрирующую практические методы реализации, и

ISSN 3030-3907

практические рекомендации для операторов, стремящихся установить или усовершенствовать возможности управления SLA. Эти вклады адресуют значительный пробел в существующей литературе, предоставляя практическое руководство по реализации SLA в телекоммуникационных средах развивающихся рынков.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Barakabitze, A. A., Ahmad, A., Mijumbi, R., & Hines, A. (2020). 5G network slicing using SDN and NFV: A survey of taxonomy, architectures and future challenges. Computer Networks, 167, 106984. https://doi.org/10.1016/j.comnet.2019.106984

2. Chergui, H., & Verikoukis, C. (2020). Offline SLA-Constrained Deep Learning for 5G Networks Reliable and Dynamic End-to-End Slicing. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 38(2), 350-360. https://doi.org/10.1109/JSAC.2019.2959186

3. Qureshi, H. N., Manalastas, M., Zaidi, S. M. A., Imran, A., & Al Kalaa, M. O. (2021). Service Level Agreements for 5G and Beyond: Overview, Challenges and Enablers of 5G-Healthcare Systems. IEEE Access, 9, 1044-1061. https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.3046927

4. Zhang, H., Xu, S., Zhang, S., & Jiang, Z. (2022). Slicing Framework for Service Level Agreement Guarantee in Heterogeneous Networks—A Deep Reinforcement Learning Approach. IEEE Wireless Communications Letters, 11(1), 193-197. https://doi.org/10.1109/LWC.2021.3123733

5. Jalalian, A., Yousefi, S., & Kunz, T. (2023). Network Slicing in Virtualized 5G Core with VNF Sharing. Journal of Network and Computer Applications, 214, 103631. https://doi.org/10.1016/j.jnca.2023.103631

6. Maroudis, A. C., Theodoropoulos, T., Violos, J., et al. (2023). Leveraging Graph Neural Networks for SLA Violation Prediction in Cloud Computing. IEEE Transactions on Network and Service Management, 20(3), 3456-3470. https://doi.org/10.1109/TNSM.2023.3291902

7. Mehmood, K., Tariq, M. I., Verbeke, W., Khan, S. A., et al. (2023). Intent-driven Autonomous Network and Service Management in Future Cellular Networks. Computer Networks, 220, 109477. https://doi.org/10.1016/j.comnet.2022.109477

8. Sharma, Y., Bhamare, D., Kassler, A., & Taheri, J. (2023). SLA Management in Intent-Driven Service Management Systems: A Taxonomy and Future Directions. ACM Computing Surveys, 55(14s), Article 339, 1-36. https://doi.org/10.1145/3589339

9. ITU-T Recommendation M.1340 (2019). Service Level Agreement for telecommunication services. International Telecommunication Union.

ISSN 3030-3907

10. ITU-T Recommendation E.800 (2008). Definitions of terms related to quality of service. International Telecommunication Union.
11. ETSI GS NFV-MAN 001 (2014). Network Functions Virtualisation (NFV); Management and Orchestration. European Telecommunications Standards Institute.
12. TM Forum GB917 (2005). SLA Management Handbook, Release 2.5. TeleManagement Forum.
13. Cisco Systems (2023). IP Service Level Agreements Configuration Guide. Cisco IOS Release 15.x.
14. Republic of Uzbekistan (2020). Digital Uzbekistan 2030 Strategy. Presidential Decree No. UP-6079.
15. 3GPP TS 23.501 (2023). System architecture for the 5G System (5GS). 3rd Generation Partnership Project.

ISSN 3030-3907