

Міхненко Я.О.

Національний технічний університет України

«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

АНАЛІЗ ЯКОСТІ ОБСЛУГОВУВАННЯ В ПРОГРАМНО-ВИЗНАЧЕНИХ МЕРЕЖАХ

Парадигма програмно-визначених мереж (SDN) виникла у відповідь на обмеження традиційних мережеских архітектур, які не могли задовольнити зростаючі вимоги до швидкості, гнучкості та ефективності, необхідні в умовах сучасного цифрового середовища. Основними перевагами SDN є централізований глобальний мережеский огляд, що дозволяє адміністраторам отримувати та аналізувати інформацію про мережу в реальному часі, а також програмованість, яка забезпечує можливість налаштування мережі відповідно до специфічних потреб користувачів і застосунків у сучасному житті.

Інтернет став основою цифрового суспільства, функціонуючи як розподілена мережа з комутацією пакетів, що підключена практично до кожного цифрового пристрою, доступного в будь-якій точці світу. Це відкриває нові горизонти для взаємодії, комунікації й обміну інформацією, але також створює виклики, пов'язані з безпекою та управлінням. Традиційна мережа має кілька проблем, зокрема залежність від постачальників, жорстку політику маршрутизації, обмежену адаптивність до змінюваних умов, а також труднощі в масштабуванні, що можуть негативно вплинути на її загальну продуктивність і ефективність.

У статті досліджується систематичний огляд якості обслуговування (QoS) на основі проблем контролера, що є критично важливим аспектом для функціонування SDN. Аналізується поточний стан досліджень у цій галузі, узагальнюються результати роботи різних контролерів, які оцінюються за параметрами QoS, такими як надійність, масштабованість, узгодженість і балансування навантаження. Ці параметри є ключовими для забезпечення ефективної роботи мережі, яка повинна відповідати вимогам сучасних користувачів і бізнесу. Також визначено потенційні проблеми, які в подальшому необхідно вирішити для забезпечення кращих і більш повних можливостей QoS у мережах SDN/OpenFlow. Це включає в себе необхідність розробки нових алгоритмів, удосконалення існуючих технологій та інтеграцію з іншими мережескими рішеннями для досягнення максимальної ефективності та безпеки.

Ключові слова: програмно-визначена мережа, якість обслуговування, продуктивність мережі, пропускна здатність, затримка, джитер, архітектура SDN, ефективні механізми QoS.

Постановка проблеми. Програмно-визначені мережі – це новий підхід до управління мережами, який кардинально змінює спосіб проектування, управління та експлуатації мереж. У традиційних мережах рівень контролю та рівень дати тісно інтегровані всередині мережеских пристроїв, таких як маршрутизатори та комутатори. Однак, SDN роз'єднує ці компоненти, дозволяючи мережеским адміністраторам програмно керувати мережею з централізованого програмного контролера. Такий централізований контроль дозволяє динамічну конфігурацію та управління мережескими ресурсами, роблячи мережу більш гнучкою, чутливою та адаптованою до мінливих вимог. З погляду на це SDN є значущим у сучасному управлінні мережами з кількох причин, по-перше, він підвищує гнучкість, дозволяючи швидко та автоматизовану конфігурацію мережеских пристроїв, скорочуючи час, необхідний для

впровадження та обслуговування; по-друге, він покращує масштабованість і ефективність, дозволяючи мережеским адміністраторам динамічно масштабувати ресурси відповідно до реальних потреб. Отже, SDN сприяє інноваціям, надаючи платформу для розробки та впровадження нових мережеских послуг і додатків.

Однак в даному класі мереж виникають проблеми щодо якості обслуговування (QoS). Мережі постійно змінюються, умови також можуть швидко змінюватися, впливаючи на критичні фактори якості обслуговування, такі як доступна пропускна здатність та затримка. Наприклад, забезпечення стабільного та надійного QoS при змінних мережеских навантаженнях і різноманітних моделях трафіку є серйозною проблемою для мережеских адміністраторів. У середовищі SDN проблематика полягає в безперешкодному розширенні для розміщення зростаючої кількості підключе-

них пристроїв і додатків. Масштабування мережі з одночасним збереженням стабільного рівня QoS вимагає ефективного управління ресурсами та трафіком для задоволення потреб більшої мережі.

SDN передбачає поєднання різноманітних пристроїв і технологій, які повинні безперервно працювати разом. Досягнення послідовного досвіду QoS на різних елементах мережі вимагає встановлення стандартизованих протоколів і інтерфейсів для забезпечення плавної взаємодії. А встановлення та забезпечення єдиної політики QoS на всій мережевій інфраструктурі є складним завданням, яке передбачає узгодження налаштувань QoS з різними вимогами різних додатків та задоволення очікувань різних користувачів, що вимагає ретельного управління політикою.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Програмно-визначена мережа постає як багатообіцяюча зміна парадигми, яка відокремлює площину управління від площини даних. Вона може [1] централізовано моніторити та контролювати мережу за допомогою програмного забезпечення, тобто контролера. Розгортання одного контролера є неефективним для обробки великого мережевого трафіку, таким чином, створення кількох контролерів є необхідним для поточної програмно-визначеної мережі в глобальних мережах.

Парадигма програмно визначеної мережі виникла у відповідь на обмеження традиційної мережевої архітектури. Основними перевагами є [2] централізований перегляд глобальної мережі, можливість програмування та розділення площини даних і площини керування. Ці функції привернули увагу дослідників для покращення надання QoS різноманітних сучасних мережевих програм. У статті [3] досліджуються можливості технології програмно-визначеної мережі для надання гарантій якості обслуговування.

У статті [4] запропоновано алгоритм планування на основі архітектури програмно визначеної мережі. Представлено рхітектуру SDN та запропоновано удосконалений адаптивний багатопляховий алгоритм балансування навантаження на основі SDN.

Проведений аналіз робіт показав, що існуючі дослідження та розробки в галузі програмно-визначених мереж недостатньо враховують такі важливі аспекти, як надійність та масштабованість при забезпеченні якості обслуговування.

Постановка завдання. Метою роботи є аналіз методів підвищення параметрів якості обслуговування для забезпечення оптимальної продуктивності мережі.

Виклад основного матеріалу. В традиційних мережах, пристрої, такі як маршрутизатори та комутатори, виконують роль управління трафіком, забезпечуючи необхідний напрямок передачі даних між різними сегментами мережі, а також здійснюють контроль за маршрутизацією, фільтрацією і передачею інформації між пристроями та користувачами. Основним принципом SDN є розділення ролей: централізована платформа керування (контролер) приймає рішення, а пристрої (комутатори, маршрутизатори) просто роблять виконання цих рішень, передаючи та обробляючи трафік згідно з вказівками, отриманими від контролера, що дозволяє гнучко налаштовувати і оптимізувати мережу в реальному часі.

Основні терміни та визначення. Якість обслуговування полягає в тому, щоб переконатися, що процеси в мережі, які повинні відбуватися швидко і надійно.

Пропускна здатність це показник кількості одиниць інформації, яку система може обробляти за певний проміжок часу. Цей термін широко застосовується до різного роду систем, починаючи від різних аспектів комп'ютерних та мережевих систем до організацій. Споріднені заходи щодо продуктивності системи включають швидкість, з якою може бути завершено певне робоче навантаження, та час відгуку, кількість часу між одним інтерактивним запитом користувача та отримання відповіді. Затримка – це час, необхідний для передачі даних з однієї точки в іншу. Низька затримка означає, що дані надходять швидко.

Джиттер – небажані фазові та/або частотні випадкові спотворення під час передачі сигналу. Виникають внаслідок нестабільності тактового генератора, змін параметрів лінії передачі в часі та різної швидкості поширення частотних складових одного і того ж сигналу. У цифрових системах проявляється у вигляді випадкових швидких змін цифрового сигналу в часі, що призводить до розсинхронізації та, як наслідок, спотворення переданої інформації.

Надійність – це характеристика, що визначає можливість абонентів обмінюватися інформацією по мережах зв'язку в умовах виникнення технічних відмов і експлуатаційних помилок на її елементах без помітного погіршення імовірісно-часових показників обслуговування заявок.

Далі розглянемо архітектуру SDN та існуючі ефективні механізми QoS (рис. 1). У традиційній мережі самі пристрої вирішують, як обробляти трафік. Це може призвести до перевантаження, оскільки кожен пристрій приймає власні рішення.

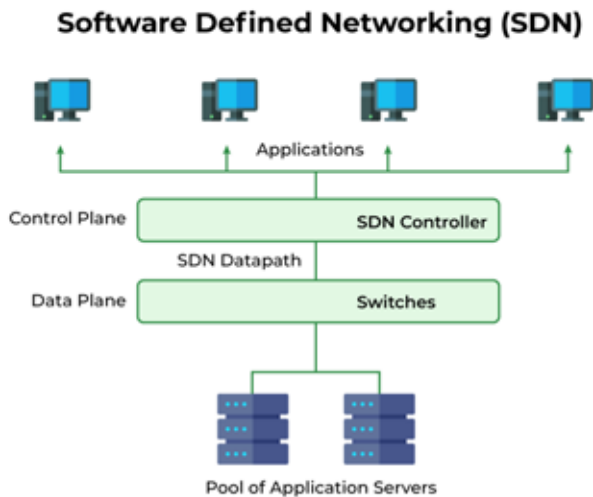


Рис. 1. Архітектура SDN

В SDN центральний контролер [6] має карту і планує найкращі маршрути для кожного типу трафіку. Це планування включає найшвидші та надійні маршрути.

Парадигма програмно-визначених мереж [9] виникла у відповідь на обмеження традиційних мережових архітектур. Систематичний огляд QoS на основі проблем контролера, аналізує поточний стан досліджень і узагальнюються результати роботи різних контролерів на основі параметрів QoS, таких як надійність, масштабованість, узгодженість і балансування навантаження.

Розглянемо потенційні проблеми які виникають у мережах SDN/OpenFlow:

1. Рівень передачі даних (Data Plane): рівень передачі даних у мережі SDN виконує інструкції, отримані від контролера SDN. Він відповідає за виконання правил маршрутизації [5], визначених контролером, і забезпечує направлення пакетів відповідно до заданих програм.

2. Контролер SDN (SDN Controller): Контролер SDN є централізованою платформою керування архітектури SDN, що забезпечує централізовану точку для керування та управління мережею. Він спілкується з рівнем передачі даних SDN, щоб приймати рішення щодо маршрутизації пакетів.

3. Рівень управління операціями (Operation Plane): включає різноманітні мережові служби та операції, які керують поведінкою мережі, такі як балансування навантаження, брандмауери тощо. Рівень управління операціями конфігурує та моніторить рівень передачі даних мережі.

4. Рівень управління (Control Plane): діє як контролер і є програмно-керованою мережевою системою. Рівень управління приймає всі

рішення щодо маршрутизації [5] на основі топології мережі, а також керує різними контролерами та іншими компонентами.

Для відеодзвінків або потокової передачі більша пропускна здатність забезпечує більш плавну роботу. У завантаженій мережі правильне керування гарантує, що кожен отримає справедливую частку «магістралі», запобігаючи затримкам. Управління смугою пропускання в SDN схоже на централізоване регулювання потоків у транспортній системі за допомогою інтелектуальної системи управління. Це означає, що SDN дозволяє контролювати потоки даних через мережу, керуючи розподілом смуги пропускання на основі політик, пріоритетів і реального стану мережі. В мережах SDN зменшення втрати пакетів у досягається за рахунок централізованого управління мережею, динамічного перенаправлення трафіку та застосування політик якості обслуговування. Оскільки в SDN контроль і управління мережею відділені від передачі даних, це забезпечує більшу гнучкість для запобігання та мінімізації втрат пакетів. А надійністю описується здатність інфокомунікаційної системи функціонувати без збоїв протягом певного часу. Вона залежить від апаратного та програмного забезпечення, а також від стійкості до помилок.

Проведемо аналіз методів поліпшення QoS в SDN які охоплюють широкий спектр підходів і технологій та забезпечують ефективну передачу даних, зменшення затримок, мінімізацію втрат пакетів і підтримку необхідної пропускної здатності для критично важливих застосувань. SDN, завдяки централізованому управлінню мережею, надає розширені можливості для оптимізації QoS.

Віртуальні сегменти мережі для індивідуального QoS є методологією, що дозволяє поділити фізичну мережу на кілька віртуальних сегментів, кожен із яких налаштовується під конкретні вимоги до якості обслуговування. У контексті SDN цей процес реалізується завдяки централізованому управлінню мережею, що забезпечує гнучкість і ефективність налаштування (табл. 1).

Підходи на основі машинного навчання (ML) у SDN стають все більш популярними завдяки можливостям аналізу складних мережових умов, автоматизації управління та оптимізації роботи мережі. Використання ML [7] у SDN допомагає вирішувати завдання, пов'язані з передбаченням трафіку, виявленням аномалій, покращенням QoS та управлінням ресурсами (табл. 2).

Досягається це основними напрямками машинного навчання як передбачення трафіку,

Таблиця 1

Приклади віртуальних сегментів і QoS-параметрів

Тип віртуальних сегментів	Призначення	QoS-параметри
eMBB (Enhanced Mobile Broadband) – розширений мобільний широкосмуговий доступ	Стрімінгові сервіси, AR/VR	Висока пропускна здатність, помірна затримка
URLLC (Ultra-Reliable Low Latency Communication) – наднадійний зв'язок із низькою затримкою	Телемедицина, автономні авто	Низька затримка, висока надійність
mMTC (Massive Machine-Type Communications) – масивні комунікації машинного типу	ІоТ, розумні міста	Масштабованість, оптимізація енергоспоживання
Користувачський віртуальний сегмент	Специфічний сервіс (наприклад, корпоративний VPN)	Пропускна здатність та безпека

Таблиця 2

Підходи ML, які використовуються у SDN

Категорія ML	Приклади задач у SDN	Методи
Класифікація	Виявлення DDoS-атак, класифікація трафіку	Support Vector Machines, Decision Trees
Регресія	Прогнозування пропускної здатності	Лінійна регресія, LSTM
Кластеризація	Групування схожих потоків трафіку	K-Means, DBSCAN
Аномалійний аналіз	Виявлення аномалій у трафіку	Autoencoders, Isolation Forest
Reinforcement Learning (RL)	Оптимізація маршрутизації, балансування навантаження	Q-Learning, Deep Q-Networks
Deep Learning (DL)	Складний аналіз QoS, передбачення мережевого стану	CNN, RNN, LSTM

виявлення аномалій та безпека, оптимізація QoS, балансування навантаження, енергозбереження та інші.

Динамічні механізми регулювання QoS забезпечують адаптивне управління мережею для підтримки стабільної якості обслуговування, навіть у разі змін у трафіку, навантаженні або мережевих умовах. У контексті сучасних мереж, особливо SDN, ці механізми дозволяють гнучко реагувати на зміни в реальному часі та підвищувати ефективність роботи мережі.

До таких механізмів відносять системи та алгоритми, які: аналізують поточні умови мережі; динамічно змінюють параметри QoS (пропускну здатність, пріоритети трафіку, затримку, джиттер) для різних потоків трафіку; адаптують мережеву поведінку до змін у реальному часі.

Проблеми впровадження QoS в SDN. Хоча SDN пропонує значні переваги, реалізація QoS в середовищах SDN має наступні проблеми:

1. Навантаження на контролер: масштабованість: зі зростанням мереж контролер може стати єдиною точкою відмови та вузьким місцем; складність – управління великою кількістю потоків і політик може бути складним і ресурсомним.

2. Управління таблицями потоків: записи в таблиці потоків – ефективне управління записами в таблиці потоків є критичним для оптимальної продуктивності; динамічні шаблони трафіку – адаптація до динамічних шаблонів трафіку та оновлення таблиць потоків в реальному часі може бути складним завданням.

3. Проблеми безпеки: централізована точка керування – централізований контролер може стати мішенню для атак, що може призвести до компрометації всієї мережі; безпечне спілкування – забезпечення безпечного зв'язку між контролером і мережевими пристроями є важливим.

4. Проблеми взаємодії: впровадження специфік для постачальників – різні постачальники можуть мати різні реалізації SDN, що призводить до проблем взаємодії; стандартизація – необхідність стандартизованих протоколів і API для забезпечення безперебійної інтеграції різних компонентів SDN.

5. Виконання політик QoS: моніторинг і контроль в реальному часі – забезпечення виконання політик QoS в реальному часі, особливо під час пікових навантажень або мережевих збоїв; динамічне налаштування – адаптація політик QoS до змін умов мережі та вимог додатків.

6. Відмова контролера та відновлення: толерантність до помилок – реалізація механізмів для обробки відмов контролера та забезпечення стійкості мережі; швидке відновлення – мінімізація простою та відновлення функціональності мережі після відмови контролера.

7. Складність мережі: великомасштабні мережі – управління QoS у великомасштабних мережах зі складною топологією може бути складним; різноманітні потоки трафіку – обробка різних типів трафіку (наприклад, голос, відео, дані) з різними вимогами до QoS.

Для вирішення вище викладених проблем потрібне ретельне планування, надійна реалізація та постійний моніторинг і оптимізація. Ефективне управління цими проблемами дозволить SDN забезпечити значні переваги з точки зору продуктивності мережі, гнучкості та масштабованості.

Розглянемо основні тенденції та напрямки досліджень.

Машинне навчання та штучний інтелект. Ці методи дозволяють аналізувати мережеві умови, прогнозувати шаблони трафіку та динамічно оптимізувати мережеві ресурси. Враховуючи такі фактори, як використання мережі, затримка та умови навколишнього середовища, алгоритми машинного навчання можуть приймати інтелектуальні рішення для покращення QoS в реальному часі. Дослідники все частіше досліджують інтеграцію методів машинного навчання для підвищення QoS в SDN. Це передбачає використання алгоритмів штучного інтелекту для аналізу мережі в реальному часі, виявлення аномалій та прийняття інтелектуальних рішень для динамічної оптимізації параметрів QoS.

Інтелектуальна мережа на основі намірів (Intent-Based Networking, IBN). Мережі на основі намірів спрямовані на спрощення управління мережею шляхом дозволу адміністраторам вказувати високорівневі наміри, а мережа автономно перекладає їх у виконувани конфігурації. Цепідвищує ефективність і зручність користувача при управлінні QoS в SDN.

Блокчейн для безпеки та довіри. Технологія блокчейн [8, 10, 11] досліджується на предмет її потенціалу забезпечення безпеки та довіри в середовищах SDN. Децентралізований та стійкий до підробок характер блокчейну може вирішити проблеми безпеки, пов'язані з реалізацією QoS.

Інтеграція периферійних обчислень. Зі зростанням обчислень периферійної мережі зростає потреба в інтеграції SDN та edge computing для оптимізації QoS для додатків, які вимагають низької затримки та високої пропускну здатності.

Міждоменне управління QoS. Проблеми взаємодії зберігаються в багатодоменних середовищах SDN. Дослідження можуть усунути ці прогалини, розробивши стандартизовані підходи до міждоменного керування QoS, що забезпечить безперебійну координацію між різними доменами мережі.

Отже, більшість моделей QoS наразі орієнтовані на мережу. Подальші дослідження можуть вивчити розробку орієнтованих на користувача моделей QoS, які враховують суб'єктивний досвід кінцевих користувачів, гарантуючи, що покращення QoS узгоджуються з очікуваннями користувачів.

Висновки. SDN змінює мережеву архітектуру, пропонуючи централізований контроль та програмованість і цей концептуальний зсув відкриває нові можливості для поліпшення показників QoS. Динамічні можливості інженерії трафіку SDN виділяються як ключовий фактор оптимізації продуктивності мережі, а здатність адаптувати та керувати потоками трафіку в реальному часі значно сприяє мінімізації затримки, джиттера та втрати пакетів. Визначним аспектом покращення QoS є інтеграція SDN із середовищами хмарних обчислень яка сприяє ефективному розподілу ресурсів на основі вимог додатків, підвищуючи загальну якість обслуговування в мережі. А інтеграція SDN із середовищами хмарних обчислень створює можливості для підвищення якості обслуговування шляхом ефективного розподілу ресурсів на основі вимог додатків.

Список літератури:

1. Singh A.K., Srivastava S. A survey and classification of controller placement problem in SDN. *International Journal of Network Management*. 2018. № 28, P. 1–25. DOI: 10.1002/nem.2018.
2. Karakus M., Durresi A. Quality of Service (QoS) in Software Defined Networking (SDN): A survey. *Journal of Network and Computer Applications*. 2017. № 80. P. 200–218. DOI: 10.1016/j.jnca.2016.12.019.
3. Aiman A.N, Tarik T, JaeSeung S. A software-defined queuing framework for QoS provisioning in 5G and beyond mobile systems. *IEEE Network*. 2021. № 35(2). P. 168–173. DOI: 10.1109/MNET.011.2000441.
4. Lu L. Multi-path allocation scheduling optimization algorithm for network data traffic based on SDN architecture. *IMA Journal of Mathematical Control and Information*. 2020. Vol. 37, Issue 4. P. 1237–1247, DOI: 10.1093/imamci/dnaa011.

5. Casas-Velasco D.M., Rendon O.M.C., da Fonseca N.L.S. Intelligent routing based on reinforcement learning for software-defined networking. *IEEE Transactions on Network and Service Management*. 2021. Vol. 18, № 1. DOI: 10.1109/TNSM.2020.3036911.
6. Oktian YE, Lee S, Lee H, Lam J. Distributed SDN controller system: A survey on design choice. *Comput Networks*. 2017. № 121, P. 100–111. DOI: 10.1016/j.comnet.2017.04.038.
7. Mahdi Fallah and Parya Mohammadi. Optimizing QoS Metrics for Software-Defined Networking in Federated Learning. *Mobile Information Systems*. 2023. DOI: 10.1155/2023/3896267.
8. Murat K, Evrim G, Furkan A, Suleyman U. QoS-CAPE: QoS-Centric Adaptive Path Engineering with Blockchain-Enabled Reinforcement Learning. *Innovations in Intelligent Systems and Applications Conference (ASYU)*. 2024. P. 1–6. DOI: 10.1109/ASYU62119.2024.10757123.
9. Huang X, Cheng S, Cao K. A survey of deployment solutions and optimization strategies for hybrid SDN networks. *IEEE Communications Surveys Tutorials*. 2019. Vol. 21, №. 2. P. 1483–1507. DOI: 10.1109/COMST.2018.2871061.
10. Karakus M, Guler E. RoutingChain: A Proof-of-Concept Model for a Blockchain-Enabled QoS-Based Inter-AS Routing in SDN *IEEE BlackSeaCom*. 2020. P. 1-6. DOI: 10.1109/BlackSeaCom48709.2020.9235021.
11. Guler E, Karakus M, Uludag S. Spectrum chain: An efficient spectrum management framework in blockchain-enabled flexible SDONs. *ICC 2022 IEEE International Conference on Communications*. 2022. P. 5744–5749. DOI: 10.1109/ICC45855.2022.9838747.

Mikhnenko Ya.O. QUALITY OF SERVICE ANALYSIS IN SOFTWARE-DEFINED NETWORKS

The paradigm of Software-Defined Networking (SDN) emerged in response to the limitations of traditional network architectures, which were unable to meet the growing demands for speed, flexibility, and efficiency required in today's digital environment. The primary advantages of SDN include centralized global network visibility, which allows administrators to access and analyse network information in real-time, and programmability, which enables customization of the network to suit the specific needs of users and applications in modern life.

The Internet has become the foundation of the digital society, functioning as a distributed packet-switched network connected to virtually every digital device available anywhere in the world. This opens new horizons for interaction, communication, and information exchange but also presents challenges related to security and management. Traditional networks face several issues, including vendor dependency, rigid routing policies, limited adaptability to changing conditions, and difficulties in scaling, which can negatively impact their overall performance and efficiency.

The article explores a systematic review of Quality of Service (QoS) based on controller-related challenges, which are critical aspects for the operation of SDN. It analyses the current state of research in this field and summarizes the performance of various controllers evaluated through QoS parameters such as reliability, scalability, consistency, and load balancing. These parameters are key to ensuring effective network operation that meets the demands of modern users and businesses. The article also identifies potential issues that need to be addressed in the future to provide better and more comprehensive QoS capabilities in SDN/OpenFlow networks. This includes the need for developing new algorithms, improving existing technologies, and integrating with other networking solutions to achieve maximum efficiency and security.

Key words: Software-Defined Networking, Quality of Service, network performance, bandwidth, latency, jitter, SDN architecture, efficient QoS mechanisms.