

В. О. Дяченко, Є. Б. Колісник, А. О. Ляшова, О. О. Можасв

Харківський національний технічний університет радіоелектроніки, Харків, Україна

МЕТОДИ МАРШРУТИЗАЦІЇ ДЛЯ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ЯКОСТІ МЕРЕЖНОГО СЕРВІСУ

Анотація. Актуальність. Актуальність методів маршрутизації для забезпечення якості мережного сервісу залишається високою в сучасному цифровому світі. Суттєве збільшення обсягів передачі даних у мережах зумовлене зростанням кількості підключених пристроїв і розвитком інтернету речей. Це вимагає більш ефективного управління пропускнуою спроможністю та затримкою для забезпечення відповідної якості обслуговування. Сучасні мережі використовуються для широкого спектра застосунків: від веб-перегляду та електронної пошти до відеоконференцій, онлайн-ігор, і потокового відео високої чіткості. Кожен застосунок має свої унікальні вимоги до якості сервісу, що зумовлює потребу в різноманітних методах маршрутизації для забезпечення оптимальної продуктивності. Слід також зазначити, що збільшення популярності потокових мультимедійних сервісів, таких як Netflix, YouTube, і Spotify, вимагає високої пропускнуої спроможності та низької затримки для забезпечення задовільного рівня сервісу. З огляду на ці фактори, методи маршрутизації для забезпечення якості мережного сервісу залишаються ключовим елементом в проектуванні та управлінні мережевою інфраструктурою, а їх розвиток і оптимізація є невід'ємною частиною забезпечення високої продуктивності та надійності мережевих сервісів. **Метою даної роботи** є дослідження існуючих методів маршрутизації для забезпечення якості мережного сервісу. **Об'єктом дослідження** є методи багатопоточної маршрутизації комп'ютерних мереж. **Предметом дослідження** є метод керування контролером програмно-конфігурованої мережі для реалізації побудованих маршрутів багатопоточного з'єднання. **Результати.** Проведено аналіз існуючих методів багатопоточної маршрутизації. Проаналізовано існуючі роботи з аналізу ефективності багатопоточної маршрутизації. Для проведення порівняльного аналізу обрані протоколи Multipath TCP та Flow Distribution Management Protocol як представники статичного та динамічного методів. Основною методологією дослідження є поєднання імітаційного моделювання та статистичних тестів. Основна гіпотеза полягає в тому, що динамічні методи будуть перевершувати статичні методи багатопоточної маршрутизації. Ця гіпотеза перевіряється на основі моделювання поведінки багатопоточних методів маршрутизації з розглянутих стратегій роботи контролера SDN. Наведено опис методу управління контролерами в програмно-конфігурованих мережах для реалізації побудованих маршрутів багатопоточного з'єднання.

Ключові слова: багатопоточна маршрутизація, метод, програмно-конфігурована мережа, QoS, мережний сервіс, методика, мультимедійний сервіс, Multipath TCP, Flow Distribution Management Protocol.

Вступ

Методи забезпечення якості обслуговування (Quality of Service, QoS) є критично важливими для багатопоточної маршрутизації, оскільки вони дозволяють керувати пріоритетами трафіку, забезпечуючи відповідні рівні пропускнуої спроможності, затримки та надійності для різних типів мережевого трафіку. Актуальність QoS у сучасних мережах не може бути переоцінена, особливо з огляду на зростаючі вимоги до мережевих ресурсів та диверсифікацію застосунків, які використовуються як у бізнес-сфері, так і в повсякденному житті. QoS є критично важливою концепцією та набором технологій, що забезпечують пріорітизацію трафіку, гарантію пропускнуої спроможності, мінімізацію затримок та забезпечення надійності для різних видів мережевих застосунків. Потокове відео, відеоконференції, VoIP (Voice over Internet Protocol) та інші мультимедійні застосунки мають строгі вимоги до затримок, джитеру (варіації затримки) та втрат пакетів. QoS дозволяє забезпечити стабільність та якість таких сервісів, навіть у переповнених або нестабільних мережах, а також підвищити енергозбереження [1].

З розвитком IoT, кількість підключених пристроїв та генерований ними трафік продовжують зростати. Мережі повинні ефективно обробляти величезні обсяги даних від сенсорів та інших IoT пристроїв, деякі з яких вимагають мінімальної затримки та високої надійності для критичних застосунків, наприклад, у сферах охорони здоров'я та автономного транспорту. Існують також і інші питання, які роблять забезпе-

чення QoS актуальним: додатки критичного значення, такі як телемедицина, системи управління транспортом та промисловий контроль, потребують гарантованих параметрів мережевого сервісу; QoS забезпечує необхідний рівень відповідальності та ефективності для підтримки цих застосунків; хмарні обчислення та сервіси вимагають ефективного управління мережевим трафіком для забезпечення доступності, продуктивності та безпеки. QoS є ключовим елементом у забезпеченні надійності та продуктивності хмарних сервісів, особливо при розгортанні масштабованих застосунків.

Методи маршрутизації для забезпечення QoS є важливим аспектом у проектуванні та управлінні мережами. Вони дозволяють визначати пріоритети для різних типів трафіку, забезпечуючи, щоб критично важливі дані були передані з належною швидкістю, мінімальною затримкою та надійністю. Використання методів багатопоточної маршрутизації для забезпечення QoS пропонує низку переваг, які покращують продуктивність та надійність мережі. Багатопоточна маршрутизація дозволяє використовувати декілька маршрутів для передачі даних між вузлами, оптимізуючи використання мережевих ресурсів і забезпечуючи більш високий рівень якості обслуговування. Використання кількох маршрутів для передачі даних знижує ризик втрати з'єднання у випадку виходу з ладу одного або декількох маршрутів. У випадку виникнення збою на одному шляху, трафік може бути автоматично перенаправлений через інший доступний маршрут, забезпечуючи безперебійність сервісу. Багатопоточна маршрутизація дозволяє балансувати навантаження

між різними маршрутами, ефективно розподіляючи трафік для уникнення перевантажень на певних ділянках мережі. Це забезпечує оптимальне використання доступної пропускної спроможності та зменшує ймовірність утворення "вузьких горловин". За допомогою багатопоточної маршрутизації можливо віддавати пріоритет трафіку від критично важливих застосунків, таких як VoIP або відеоконференції, забезпечуючи їм необхідну пропускну спроможність і мінімальну затримку. Таким чином, користувачі отримують високий рівень якості обслуговування навіть під час пікових навантажень на мережу. Розподіл трафіку через кілька маршрутів може зменшити загальну затримку, оскільки дані можуть бути передані через найменш завантажені або найшвидші шляхи. Це особливо важливо для застосунків, чутливих до затримок. Методи багатопоточної маршрутизації надають адміністраторам мережі розширені можливості для управління трафіком, включаючи моніторинг, аналіз і оптимізацію потоків даних у реальному часі, забезпечуючи високий рівень ефективності мережних операцій. Загалом, використання багатопоточної маршрутизації для забезпечення якості мережного сервісу дозволяє створити більш надійну, ефективну та високопродуктивну мережну інфраструктуру, здатну задовольнити сучасні вимоги до передачі даних. **Метою цієї роботи** є дослідження існуючих методів маршрутизації для забезпечення якості мережного сервісу

Основна частина

При розробці багатопоточних протоколів виникають завдання розподілу транспортних сегментів даних між відповідними підпотоками, розробки алгоритмів управління навантаженням для відповідних підпотоків, узгодження кількості підпотоків і створення маршрутів для кожного відповідного підпотoku.

Існує два класи методів для вирішення цієї проблеми: статичні та динамічні. У статичному методі кількість пов'язаних підпотоків транспортного з'єднання заздалегідь визначена в кожному конкретному випадку і не змінюється з часом. Кількість пов'язаних гілок може залежати від конфігурації користувача та кількості мережних інтерфейсів пристроїв-відправників і пристроїв-одержувачів (у цьому випадку гілки відкриваються на кожну пару інтерфейсів).

У динамічних методах кількість пов'язаних підпотоків у транспортному з'єднанні залежить від вимог до QoS застосунку та стану мережевого середовища. Якщо ресурсів на маршруті існуючого набору пов'язаних підпотоків недостатньо для забезпечення необхідної якості обслуговування, відкриваються додаткові підпотоки. У дослідженнях, спрямованих на аналіз ефективності багатопоточної маршрутизації, основним критерієм в більшості випадків є збільшення швидкості транспортного зв'язку при використанні статичних багатопотокових схем в заданому середовищі передачі даних або при заданому навантаженні.

В роботі [2] розглядається збільшення продуктивності статичного методу під час використання різних алгоритмів планування сегментів між підпотоками. Також є робота [3], де досліджують ефективність статичного методу для автомобілів, підключених до мережі. Ці автомобілі можуть координувати свою роботу між собою з міськими службами дорожнього руху, а

також виконувати допоміжні обчислення на інших мережних пристроях. Робота [4] присвячена дослідженню продуктивності статичного методу багатопоточної маршрутизації в бездротових децентралізованих мережах, що самоорганізуються. У статті [5] розглядається вплив різних алгоритмів управління навантаженням у разі статичного багатопотокового методу. В рамках цієї роботи було проведено дослідження масового використання статичного методу багатопоточної маршрутизації в рамках однієї автономної системи. Дослідження показало, що застосування статичного багатопотокового транспортного сполучення має перевагу перед однопотоковим з'єднанням протоколу TCP тільки за умови завантаження мережі, меншою 37%. Під завантаженням мережі розуміється середнє значення завантаження ліній зв'язку, де завантаження лінії зв'язку розраховувалася як відношення сумарної швидкості TCP потоків, що проходять цю лінію зв'язку, до її пропускної спроможності.

В роботі [6] проведено аналіз ефективності динамічного методу багатопоточної маршрутизації в контексті безпроводних мереж. Для проведення порівняльного аналізу статичного та динамічного методів багатопоточної маршрутизації необхідно вибрати протоколи, на яких буде досліджено ефективність роботи методів. Вибір проводився за такими критеріями як: клас методу, підтримка протоколу, опорний транспортний протокол, можливість використання довільного алгоритму управління навантаженням. Багатопотоковий транспортний протокол може відповідати статичному або динамічному методу. Для отримання актуальних достовірних результатів необхідно, щоб реалізація багатопотокового протоколу була відкритою та доступною, а також мала діючу підтримку, щоб відповідати поточним вимогам мереж. Багато протоколів використовують такі поширені транспортні протоколи, як TCP, UDP, для того щоб спростити впровадження цих протоколів в існуючу інфраструктуру мережі. Так як розвиток інших методів забезпечення якості сервісу не стоїть на місці, то важливо, щоб багатопотоковий протокол міг використовувати сучасні алгоритми управління навантаженням у своїй роботі.

Згідно проведеного аналізу робіт за тематикою досліджень, найбільш популярним багатопоточним протоколом, що підтримує статичний спосіб, є Multipath TCP (MPTCP) протокол [7]. Незважаючи на велику кількість різних багатопотокових протоколів багато хто з них є різними модифікаціями протоколу MPTCP. Інші багатопотокові протоколи або засновані на Stream Control Transmission Protocol (SCTP-CMT), або репрезентують новий транспортний протокол, який не має стандарту. В обох випадках багатопотоковий протокол буде складніше інтегрувати в існуючу мережу інфраструктури. Також необхідно відзначити протокол Quick User Datagram Protocol Internet Connections (MP-QUIC) заснований на тих же принципах роботи, що і протокол MPTCP, тому протокол MPTCP був обраний як основний представник статичного протоколу багатопотокового для транспортних з'єднань для проведення порівняльного аналізу ефективності статичного і динамічного методів багатопотокової маршрутизації. Крім цього, протокол MPTCP має доступну відкриту реалізацію, що підтримується, на відміну від протоколу MP-QUIC. Побудована модель

роботи методу багатопоточної маршрутизації для Bandwidth-Need Driven Energy Efficiency Improvement of MPLS (BNDEEI-MPLS) [7] як один з критеріїв відкриття підпотіку використовує енергоефективність каналу, що мало застосовується для провідних мереж Інтернет-провайдерів. Крім того, BNDEEI-MPLS спирається на припущенні, що використовується алгоритм управління навантаженням, який визначає перевантаження по втраті пакета (loss-based алгоритми).

MPLS – це модифікація протоколу TCP, що підтримує статичний метод багатопоточної маршрутизації. MPLS є розширенням традиційного протоколу передачі даних TCP (Transmission Control Protocol), яке дозволяє встановлення одного TCP-з'єднання через кілька фізичних шляхів. Це значно покращує використання ресурсів мережі, надійність з'єднання та пропускну спроможність. MPLS дозволяє передавати дані між двома кінцевими точками через кілька мережевих інтерфейсів та шляхів одночасно, забезпечуючи ефективніше використання мережевих ресурсів. У випадку відмови одного з каналів зв'язку, MPLS автоматично перерозподіляє трафік між доступними шляхами, зменшуючи перерви в обслуговуванні та підвищуючи загальну надійність з'єднання. Додатки, які використовують TCP, не потребують змін для роботи з MPLS, оскільки весь процес управління кількома шляхами виконується на транспортному рівні без залучення додаткового програмного забезпечення. Використання декількох маршрутів дозволяє агрегувати пропускну спроможність різних мережевих з'єднань, підвищуючи загальну швидкість передачі даних.

MPLS ідеально підходить для мобільних пристроїв та багатомісних середовищ, де доступно кілька мережевих інтерфейсів (наприклад, Wi-Fi та мобільний зв'язок), забезпечуючи краще використання доступних мережевих ресурсів. Розподіл трафіку через кілька шляхів може зменшити загальну затримку зв'язку, особливо для додатків, чутливих до затримок, таких як голосовий зв'язок та відеоконференції. Використання MPLS підвищує стійкість мережі до відмов, оскільки автоматичне переключення між маршрутами дозволяє уникнути перерв у з'єднанні через проблеми з одним або декількома каналами.

Протокол Flow Distribution Management Protocol (FDMP) не є широко відомим або стандартизованим протоколом у сфері мережевих технологій чи мережевої інженерії, ані не згадується як загальноприйнятий стандарт або протокол. В контексті мережевих комунікацій, ідея "управління розподілом потоків" може бути асоційована з різними механізмами та стратегіями для оптимізації проходження даних через мережу, включаючи маршрутизацію, балансування навантаження, та управління QoS. Такі механізми спрямовані на підвищення ефективності мережі, забезпечення надійності з'єднань, та гарантію, що критично важливі потоки даних обробляються з належним пріоритетом. Завдання вибору та встановлення маршруту в комп'ютерній мережі відіграє критично важливу роль у забезпеченні ефективності та надійності передачі даних між вузлами мережі. Цей процес включає в себе ряд кроків та механізмів, які дозволяють визначити найоптимальніший шлях для передачі пакетів даних від джерела до призначення. При статичній

маршрутизації маршрути встановлюються вручну адміністратором мережі. Цей метод є простим та передбачуваним, але не має гнучкості для автоматичного адаптування до змін у мережі, таких як відмови обладнання чи зміни в топології мережі. Використовуючи протоколи динамічної маршрутизації (наприклад, OSPF, EIGRP, BGP), маршрутизатори автоматично обмінюються інформацією про доступні шляхи та визначають оптимальні маршрути в реальному часі. Це забезпечує вищу стійкість та адаптивність мережі.

Маршрутизатори використовують таблиці маршрутизації для зберігання інформації про відомі маршрути. Коли пакет даних надходить до маршрутизатора, він використовує цю таблицю для визначення найкращого шляху до призначення. Для визначення найкращого маршруту маршрутизатори використовують різні метрики, такі як пропускну спроможність, затримка, кількість хопів (переходів через маршрутизатори), навантаження та надійність. Вибір маршруту залежить від алгоритму маршрутизації та налаштувань протоколу. Деякі протоколи маршрутизації підтримують балансування навантаження, дозволяючи використовувати кілька маршрутів для розподілу трафіку і таким чином покращуючи загальну пропускну спроможність та надійність мережі. Динамічна маршрутизація дозволяє мережі швидко адаптуватися до змін, автоматично переконафігуруючи маршрути в разі відмови обладнання чи інших змін у топології мережі.

Для забезпечення необхідного рівня якості для різних типів трафіку, таких як голосовий зв'язок або відео, можуть застосовуватися спеціальні правила QoS, які дозволяють віддавати пріоритет або резервувати пропускну спроможність для критично важливих даних. Завдання вибору та встановлення маршруту в комп'ютерній мережі є фундаментальним елементом мережевої інфраструктури, який впливає на продуктивність, надійність та загальну ефективність мережевих комунікацій. У програмно-конфігурованих мережах використовується централізоване управління, яке вносився в окремий логічний пристрій. Контролер програмно-конфігурованої мережі знає поточний стан мережі та може керувати установкою побудовою маршрутів. Централізоване управління програмно-конфігурованих мереж відноситься до парадигми, в якій управління мережею та її конфігурація відбуваються через централізований програмний інтерфейс. Цей підхід є ключовим елементом технології Software-Defined Networking (SDN), яка дозволяє адміністраторам мережі динамічно управляти мережевими ресурсами, оптимізувати трафік та автоматизувати процеси настройки мережі через програмне забезпечення. В традиційних мережах план управління (логіка маршрутизації, правила доступу тощо) інтегрований безпосередньо в обладнання. У програмно-конфігурованих мережах ці площини розділені. Логіка управління вносився на централізований контролер, що дозволяє більш гнучке та ефективне управління мережею. Ядром SDN є централізований програмний контролер, який комунікує з мережевими пристроями через стандартизований інтерфейс (наприклад, OpenFlow). Контролер має глобальний огляд усієї мережі, що дозволяє ефективно управляти потоками даних, маршрутизацією та політиками безпеки. Централізоване управління дозволяє автоматизувати багато аспектів конфігурації мережі, зменшуючи

витрати на її обслуговування та впроваджуючи зміни швидше та з меншим ризиком помилок. Також це забезпечує можливість швидко масштабувати мережеві ресурси відповідно до змінних потреб. SDN дозволяє мережі бути гнучкою та адаптивною до змін у вимогах до трафіку та політик управління. Це включає можливість швидко реагувати на зміни в мережевому навантаженні, автоматично перенаправляючи трафік для оптимізації продуктивності та надійності. Централізоване управління дозволяє ефективніше імплементувати політики безпеки на всій мережі, забезпечуючи консистентність та оновлення в реальному часі. Це також полегшує виявлення та реагування на мережеві загрози.

Важливим питанням є встановлення правил SDN для реалізації побудованих маршрутів багатопоточного з'єднання. Існують дві стратегії роботи контролера SDN: реактивна та проактивна. У реактивній стратегії контролер будує маршрут і встановлює правила щодо настання деякої події, наприклад, появи першого пакета нового багатопоточного з'єднання в мережі. Для цього контролер SDN налаштовує підконтрольні йому комутатори для перехоплення всіх пакетів TCP і відбирає пакети, які відносяться до багатопоточного з'єднання. У термінах протоколу OpenFlow [8], що розглядається в роботі як протокол взаємодії між контролером SDN і підконтрольними комутаторами, контролер встановлює на комутатори низькопріоритетні правила для відправлення PacketIn повідомлень на контролер для кожного TCP пакета. При надходженні PacketIn повідомлення контролер аналізує опціональну частину транспортного заголовка та шукає опції, що стосуються багатопоточного протоколу MPTCP або FDMP. Якщо відповідні опції присутні, то контролер сприйматиме цей TCP потік як підпотік багатопоточного з'єднання.

Щоб визначити, до якого багатопоточного з'єднання відноситься підпотік, що розглядається, контролер зберігає інформацію про кожен підпотік в Subflow Information Base (SIB). При надходженні першого потоку багатопоточного з'єднання в мережу контролер витягує ключ, що передається в опції MP_CAPABLE. Якщо пакет відповідає ініціації з'єднання, тобто пакет з прапором SYN, то створюється новий запис в SIB і зберігається ключ відправника. Інакше запис вже створено у SIB і зберігається ключ одержувача. На основі двох ключів контролер може обчислити хеш, який передаватиметься в наступних споріднених потоках. Виявлення розрахованого хешу в пакетах інших потоків означатиме належність невідомого до того моменту потоку до багатопоточного з'єднання, інформацію про яке тільки збережено в SIB.

За допомогою SIB контролер може визначити споріднені потоки та прокласти для них маршрути з найменшою кількістю перетинів. Наступні пакети після процедури повинні йти згідно з правилами, встановленими для відповідних маршрутів. Кожен підпотік визначається правилом OpenFlow за парою IP адрес та парою транспортних портів. Щоб підтримувати передачу пакетів в обидві сторони, контролеру необхідно встановити правил удвічі більше довжини маршруту. На противагу реактивній стратегії проактивна стратегія передбачає попереднє завантаження правил передсилання пакетів на етапі ініціалізації контролера

SDN. Отже, комутатори SDN мають обробляти пакети повністю самостійно, без втручання контролера SDN. Зокрема, комутатори SDN мають розподіляти споріднені підпотоки різними маршрутами, що мають мінімальну кількість перетинів. Самі маршрути можуть бути побудовані заздалегідь, і відповідні правила можуть бути встановлені заздалегідь, однак пакети MPTCP або FDMP не несуть жодних додаткових ознак, які можуть допомогти у визначенні приналежності тому чи іншому багатопоточному з'єднанню. Можна використовувати хеш функції для балансування за побудованими маршрутами, проте, як було зазначено раніше, відсутня гарантія того, що родинні підпотоки виходять різними маршрутами. Одним із можливих підходів для запобігання збігу маршрутів споріднених підпотоків може стати відстеження багатопоточних з'єднань у комутаторах SDN так само, як це зроблено у реактивній стратегії в контролері SDN. Однак переважним буде підхід, коли транспортні агенти допомагають комутаторам визначити споріднені підпотоки.

Пропонується використовувати змішану стратегію для реалізації багатопоточної маршрутизації у SDN. Контролер SDN заздалегідь буде маршрути з мінімальною кількістю перетинів між кожною парою точок у мережі. Кількість маршрутів визначається зі ступеня демультимплексування мережі. Побудувавши маршрути заздалегідь, ми можемо зменшити затримку на встановлення з'єднання, тому що не потрібно перераховувати їх щоразу при надходженні нового підтоку. Крім того, ми можемо заздалегідь встановити правила для кожного з маршрутів за винятком точки входу та точки виходу, тим самим скоротивши час, що витрачається на встановлення маршруту, залишивши встановлення лише двох правил. У динаміці контролер SDN має підтримувати стан цих маршрутів, де під станом розуміється залишкова пропускна спроможність маршруту. Контролер SDN може отримати стан маршруту, збираючи статистику про обсяг передається трафіку в одиницю часу (назвемо цю величину завантаженням лінії зв'язку) на кожній лінії зв'язку на маршруті і беручи мінімум з різниць пропускної спроможності та поточного завантаження. Тоді при появі нового багатопоточного з'єднання в мережі можна оцінити, чи вистачає ресурсів побудованих маршрутів для забезпечення потрібної якості сервісу для цього потоку класу чи ні. Якщо ресурсів маршрутів вистачає для задоволення вимог багатопоточного транспортного сполучення, що розглядається, то за цим транспортним з'єднанням резервуються необхідні ресурси.

Ресурси, що займаються багатопоточним транспортним з'єднанням, повинні звільнитися після завершення з'єднання. Понад те, ресурси, займані одним підпотіком, мають звільнитися під час завершення цього підпотіку, оскільки динамічний метод багатопоточної маршрутизації дозволяє закривати зайві підпотоки. Контролер SDN може дізнатися про завершення підпотіку за допомогою idle-timeout - таймера, який прив'язаний до певного правила в таблиці OpenFlow і веде свій відлік за відсутності пакетів, які відповідають цьому правилу. Якщо з'являється новий пакет мережі, який відповідає цьому правилу, то відлік починається спочатку. Після закінчення відведеного часу в idle-timeout комутатор SDN надішле

службове повідомлення на контролер SDN із зазначенням, за яким правилом спрацював idle-timeout. Використовуючи цю інформацію, контролер SDN зможе зрозуміти, який із підтоків завершив свою роботу. Так як для кожного багатопотокового транспортного з'єднання відбувається резервація ресурсів і за умови відсутності інших потоків в SDN, можна використовувати спрощену реалізацію з наступною моделлю. Зберігатимемо поточний стан кожної лінії зв'язку. У разі появи нового з'єднання MPTCP визначаємо резервовану пропускну спроможність, так як всі підпотоки MPTCP відкриваються відразу. У разі з'єднання FDMP визначаємо резерв пропускну спроможності, послідовно розглядаючи кожен маршрут і забираючи всю залишкову пропускну спроможність маршруту, поки не наберемо необхідну для виконання вимоги потоку, що розглядається. Запропонований метод дозволяє не витратити ресурси контуру управління на моніторинг завантаження ліній зв'язку.

Висновки

При впровадженні SDN виникають виклики, такі як забезпечення масштабованості та високої доступності централізованих контролерів, захист від єдиної точки відмови та забезпечення безпеки комунікацій між контролерами та мережевими елементами. Централізоване управління програмно-конфігурованих мереж представляє собою потужний підхід до управління мережею, який пропонує значні переваги у гнучкості, автоматизації та ефективності.

Для проведення порівняльного аналізу обрані протоколи Multipath TCP та Flow Distribution Management Protocol як представники статичного та динамічного методів. Основна гіпотеза перевіряється на основі моделювання поведінки багатопоточних методів маршрутизації з розглянутих стратегій роботи контролера SDN. Наведено опис методу управління контролерами в програмно-конфігурованих мережах.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Diachenko V. Інтелектуальні підходи енергозбереження у безпроводних сенсорних комп'ютерних мережах. Системи управління, навігації та зв'язку. Полтава: ПНТУ, 2020. Т. 4 (62). С. 114-118. doi: <https://doi.org/10.26906/SUNZ.2020.4.114>
2. Kovalenko, A., Kuchuk, H., Kuchuk, N. and Kostolny, J. (2021), "Horizontal scaling method for a hyperconverged network", *2021 International Conference on Information and Digital Technologies (IDT)*, Zilina, Slovakia, doi: <https://doi.org/10.1109/IDT52577.2021.9497534>
3. Petrovska, I., Kuchuk, H., Mozhaiev, M. (2022), Features of the distribution of computing resources in cloud systems, 2022 IEEE 4th KhPI Week on Advanced Technology, KhPI Week 2022 - Conference Proceedings, 03-07 October 2022, Code 183771, doi: <https://doi.org/10.1109/KhPIWeek57572.2022.9916459>
4. Kuchuk, H., Kovalenko, A., Ibrahim, B.F. and Ruban, I. (2019), "Adaptive compression method for video information", *International Journal of Advanced Trends in Computer Science and Engineering*, vol. 8(1), pp. 66–69, doi: <http://dx.doi.org/10.30534/ijatcse/2019/1181.22019>
5. Petrovska, I. and Kuchuk, H. (2023), "Adaptive resource allocation method for data processing and security in cloud environment", *Advanced Information Systems*, Vol. 7, No. 3, pp. 67–73, doi: <https://doi.org/10.20998/2522-9052.2023.3.10>
6. Semenov, S., Mozhaiev, O., Kuchuk, N., Mozhaiev, M., Tiulieniev, S., Gnusov, Yu., Yevstrat, D., Chyrva, Yu. & Kuchuk, H. (2022), "Devising a procedure for defining the general criteria of abnormal behavior of a computer system based on the improved criterion of uniformity of input data samples", *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2022, 6 (4(120)), pp. 40–49, doi: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2022.269128>
7. Datsenko, S. and Kuchuk, H. (2023), "Biometric authentication utilizing convolutional neural networks", *Advanced Information Systems*, Vol. 7, no. 2, pp. 87–91, doi: <https://doi.org/10.20998/2522-9052.2023.2.12>
8. Pfaff B. et al. OpenFlow Switch Specification—1.3 Version //Open Networking Foundation: Menlo Park, CA, USA. – 2012. NoviFlow Inc. 2021. NoviSwitch 2122 Datasheet (2019). Retrieved "May 17, 2021" from https://noviflow.com/wp-content/uploads/2019/11/NoviSwitch-2122-Datasheet-400_V5.pdf.

Received (Надійшла) 15.05.2024

Accepted for publication (Прийнята до друку) 17.07.2024

Routing methods for ensure quality of network service

Vladyslav Diachenko, Evgeny Kolisnyk, Anastasia Lyashova, Oleksandr Mozhaev

Abstract. Relevance. The relevance of routing methods to ensure the quality of network service remains high in today's digital world. A significant increase in the volume of data transmission in networks is due to the growth of the number of connected devices and the development of the Internet of Things. This requires more efficient management of bandwidth and latency to ensure adequate quality of service. Today's networks are used for a wide range of applications, from web browsing and e-mail to video conferencing, online gaming, and high-definition video streaming. Each application has its own unique requirements for quality of service, which leads to the need for various routing methods to ensure optimal performance. It should also be noted that the increasing popularity of streaming multimedia services, such as Netflix, YouTube, and Spotify, requires high bandwidth and low latency to ensure a satisfactory level of service. Given these factors, routing methods to ensure the quality of network service remain a key element in the design and management of network infrastructure, and their development and optimization are an integral part of ensuring high performance and reliability of network services. **The purpose** is a study of existing routing methods to ensure the quality of network service. **The object** of the study is the evolution of FPGA accelerators for data center (DC) and cloud computing. **The subject** are methods of multithreaded routing of computer networks. **Results.** An analysis of the existing methods of multithreaded routing was carried out. The existing works on the analysis of the effectiveness of multithreaded routing are analyzed. Multipath TCP and Flow Distribution Management Protocol protocols were selected for comparative analysis as representatives of static and dynamic methods. The main research methodology is a combination of simulation modeling and statistical tests. The main hypothesis is that dynamic methods will outperform static methods in multithreaded routing. This hypothesis is tested on the basis of modeling the behavior of multithreaded routing methods from the considered SDN controller operation strategies. A description of the method of controlling controllers in software-configured networks for the implementation of built routes of a multi-flow connection is given.

Keywords: multiflow routing, method, software-configurable network, QoS, network service, method, multimedia service, Multipath TCP, Flow Distribution Management Protocol.