

УДК 621.39

Л. Н. БЕРКМАН, доктор техн. наук, професор;

О. А. КІЛЬМЕНІНОВ, здобувач;

О. О. ЛЕЩЕНКО;

І. Е. ПОХАБОВА, аспірантка,

Державний університет телекомунікацій, Київ

## ПРОГРАМНО-КОНФІГУРОВАНІ МЕРЕЖІ: МЕТОДИ ПОБУДОВИ ТА КЕРУВАННЯ

**Описано архітектуру програмно-конфігурованих мереж, що забезпечують реалізацію принципово нового підходу до побудови та забезпечення функціонування мережі, із відокремленням механізмів керування та маршрутизації. Проаналізовано переваги і недоліки цього підходу з огляду на проблематику традиційної архітектури мережі. Розглянуто головні компоненти мереж на основі технології OpenFlow. Обґрунтовано вибір критеріїв ефективності керування інфраструктурою зазначених мереж.**

**Ключові слова:** програмно-конфігурована мережа; оптимізація; критерії ефективності.

### Вступ

Розвиток комп'ютерних мереж донедавна відбувався екстенсивним шляхом: дедалі більше пристроїв об'єднувалося в локальні і глобальні мережі, удосконалювалося мережне обладнання, зростала пропускна здатність каналів передавання даних, підвищувалася швидкодія серверів і мережних компонентів.

Проте принципово нові вирішення не набувають, як правило, широкого впровадження, і поступово існуючі мережі перестають справлятися зі стрімко зростаючою кількістю пристроїв і потоків даних. Мережний трафік і його структура зазнали зрештою істотних змін, оскільки кожний запит породжує численні звернення до серверів додатків, баз даних, інших систем зберігання та обробки інформації. Складність сучасної мережної інфраструктури, а також зростання трафіку призводять до все частіших відмов, а отже, і до різкого погіршення швидкісних характеристик передавання даних.

При цьому існуюча мережна архітектура, зорієнтована на групу досить застарілих протоколів для забезпечення взаємодії, ускладнюється мережними пристроями, що стають на заваді масштабуванню. Додавання нових пристроїв вимагає великих зусиль, передусім щодо перенастроювання комутаторів, маршрутизаторів і мережних екранів. Натомість мережна структура, залишаючись статичною, потребує значних коштів для її підтримання.

Вочевидь, для впровадження інновацій, таких, скажімо, як хмарні обчислення та віртуалізація, потрібні нові підходи до організації мереж. Саме тому останніми роками зріс інтерес до нової архітектури, якою характеризується *програмно-конфігуровані мережі* (ПКМ) — *Software Defined Networks (SDN)*, здатні подолати кризу [1], що насувається.

Концепція ПКМ визначає зсув парадигми в мережній архітектурі, коли рівень керування мережею програмується безпосередньо і відокремлю-

ється від маршрутизації пакетів. Завдяки перенесенню управління забезпечується абстрагованість основної мережі стосовно додатків верхніх рівнів, а це, у свою чергу, дозволяє їм розглядати мережу як логічну чи віртуальну сутність. Зокрема, протокол *OpenFlow (OF)*, застосовуваний у багатьох мережних пристроях, дає змогу перемістити функції керування маршрутизаторами мережі в центральний модуль, названий *контролером*, або мережною операційною системою [2].

Зростання кількості та розмаїття контенту, розвиток сервісів і масштабів, що їх вони охоплюють, призвели до зміни парадигми організації обчислень: на місце клієнт-серверної їх організації прийшли центри обробки даних і хмарні обчислення, файлові системи та бази даних трансформувалися в мережі зберігання даних.

Таким чином, у традиційних мережах нагромадилася низка проблем, розв'язання яких вимагає внесення змін в існуючу архітектуру:

- ◆ *науково-технічні проблеми* — сьогодні неможливо контролювати та надійно передбачити поведінку таких складних об'єктів, як комп'ютерні мережі;

- ◆ *соціальні проблеми* — у повсякденному житті ми дедалі більше покладаємося на мережу Інтернет, хоча безпека даних, включаючи персональні дані, зовсім не гарантована через нестійкість інтернет-простору до зовнішніх атак;

- ◆ *економічні проблеми* — мережі високовартісні й складні в обслуговуванні, вимагають висококваліфікованих фахівців;

- ◆ *проблеми розвитку* — в архітектурі сучасних мереж існують суттєві бар'єри щодо введення інновацій, експериментування, створення нових сервісів.

### Архітектура

#### *програмно-конфігурованих мереж*

Як уже зазначалося, ПКМ — це новий підхід до побудови архітектури комп'ютерних мереж, згідно з яким рівень керування (РК) мережею і рівень

передавання даних (РПД) поділяються за рахунок перенесення функцій керування (виконуваних у традиційній мережі маршрутизаторами і комутаторами) на окремі центральні пристрої, названі контролерами. За рахунок такого поділу контроль стану мережі та керування нею логічно зосереджено на контролері. Окрім того цей підхід дозволяє, аби рівень керування абстрагувався від фізичної мережної інфраструктури рівня передавання даних, використовуючи деяке логічне подання мережі. Взаємодія між РК і РПД відбувається за допомогою єдиного уніфікованого відкритого інтерфейсу.

Головні ідеї підходу ПКМ сформулювали 2006 року фахівці університетів Стенфорда (Нік Маккеон) і Берклі (Скотт Шенкер). Відтоді ці ідеї знаходять найширшу підтримку в академічному середовищі, співтоваристві провідних виробників мережного устаткування та з боку великих ІТ-компаній.

Зацікавленість провідних ІТ-компаній зумовлюється тим, що, як показали перші практичні експерименти, ПКМ-підхід дозволяє підвищити ефективність мережного обладнання на 25-30%, знизити витрати на експлуатацію мереж більш ніж на третину, підвищити гнучкість керування мережею за рахунок реалізації відповідних програм, істотно підвищити безпеку, програмно створювати нові сервіси та оперативно завантажувати їх у мережне обладнання. Упровадження цього підходу має, насамперед, істотно вплинути на функціонування мереж центрів обробки даних (дата-центрів, ЦОД), корпоративних мереж, WAN, стільникових і домашніх мереж.

Основні ідеї, закладені в ПКМ, такі:

- відокремлення рівня передавання від рівня керування даними;
- єдиний уніфікований і незалежний від постачальника інтерфейс між рівнем керування та рівнем передавання даних;
- логічно централізований рівень керування даними;
- віртуалізація фізичних ресурсів мережі.

Архітектура ПКМ згідно з [3] має три рівні (рис. 1).

1. *Рівень інфраструктури мережі*, що включає в себе набір мережних пристроїв (комутаторів, маршрутизаторів) і каналів передавання даних.

2. *Рівень керування*, на якому відстежується і підтримується глобальне подання мережі, тобто її топологія та стан мережних пристроїв. Рівень керування надає програмний інтерфейс (API) для мережних додатків.

3. *Рівень мережних додатків*, в яких реалізуються різні функції керування мережею: керування потоками даних у мережі, керування безпекою, моніторинг трафіку, керування якістю сервісу, керування політиками тощо.

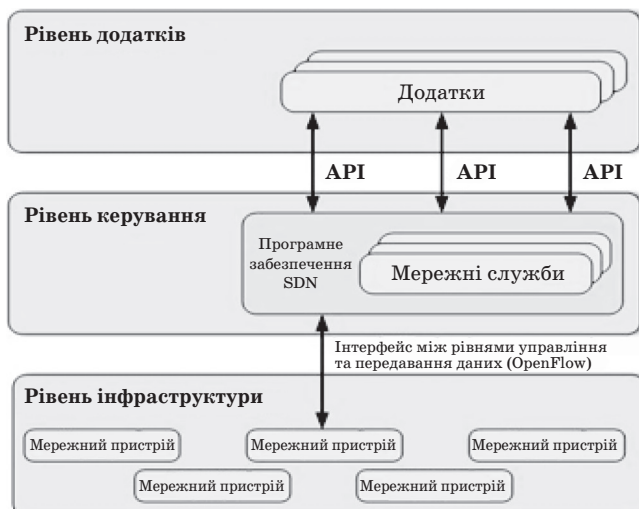


Рис. 1. Архітектура програмно-конфігурованих мереж

Сучасні маршрутизатори виконують два основні завдання: передавання даних (forwarding) — просування пакета від вхідного порту на певний вихідний порт, а також керування даними — обробка пакета і ухвалення рішення про те, куди його спрямувати з огляду на поточний стан маршрутизатора. Отже, у рамках всієї мережі можна виокремити рівень передавання даних, що складається із засобів передавання даних (ліній зв'язку, каналотвірного обладнання, маршрутизаторів і комутаторів), та рівень керування станами засобів передавання даних.

Розвиток маршрутизаторів відбувався в напрямку зближення та «зрощування» РПД і РК, апаратного прискорення, удосконалення ПЗ і впровадження нових функціональних можливостей для прискорення ухвалення рішення щодо маршрутизації кожного пакета. Але при цьому РК залишився досить примітивним, із оперттям на складні розподілені алгоритми маршрутизації та хитромудрі інструкції з питань конфігурації чи налаштування мережі.

Зауважимо, що програмне забезпечення маршрутизаторів, яке реалізує РК, залишалося пропрієтарним і закритим для розробників, дослідників і мережних операторів. І саме згідно з підходом ПКМ було запропоновано розмежувати РК і РПД.

Таким чином, архітектура ПКМ і пропонований централізований підхід дають чимало переваг порівняно з традиційними мережами, що характеризуються розподіленим керуванням передавання даних.

❖ Програмованість і гнучкість керування мережею, значне спрощення модифікації керування мережею за рахунок створення нових додатків або зміни існуючих, автоматизація керування та адміністрування мережами.

❖ Адаптивність керування мережею, тобто можливість змінювати поведінку та стан мережі в режимі реального часу з урахуванням мінливих

умов функціонування, пристосовуючись до них, адаптуватися до мінливих потреб користувачів мереж за рахунок створення нових мережних додатків і сервісів. На розробку мережних додатків потрібно значно менше часу, ніж у разі ручного переконфігурування всієї мережі.

❖ Незалежність від устаткування та пропрієтарного програмного забезпечення виробників мережного устаткування.

❖ Можливість незалежного розгортання РК і РПД.

❖ Можливість незалежного масштабування РК і РПД.

❖ Підвищення надійності за рахунок зниження обсягу розподіленого стану для керування. Наявні розподілені протоколи, які працюють на кожному вузлі мережі, що підтримує базу даних розподілених копій станів каналів у цьому вузлі, замінюються інформацією, централізовано зосередженою в одному місці — на контролері. Вочевидь, така централізована база даних міститиме значно менше неузгодженої інформації. Зокрема, зазначений підхід дозволить зменшити ймовірність циклів у мережі.

❖ Спрощення структури й логіки мережних пристроїв завдяки уникненню обробки стандартів і протоколів, із виконанням тільки інструкцій, отриманих від контролера.

❖ Зниження вартості комутаторів і мережної інфраструктури загалом за рахунок винесення «мізків роутерів» у контролер.

Отже, підхід ПКМ дозволяє значно автоматизувати й спростити керування мережами завдяки їх «програмуванню», що уможливорює побудову масштабованих мереж, здатних легко адаптуватися до мінливих умов функціонування та потреб користувачів. Упровадження цього підходу дає особливо високий ефект, коли йдеться про керування мережною інфраструктурою в ЦОД, корпоративними мережами, WAN, стільниковими та домашніми мережами.

Утім архітектура ПКМ не позбавлена певних недоліків, через що доводиться стикатися з низкою проблем.

◆ Проблема надійності, зумовлена тим, що контролер виступає потенційною точкою відмови роботи мережі, передусім із таких причин:

- обсяг керуючого трафіку, призначеного для централізованого контролера, зростає пропорційно до кількості комутаторів у мережі;
- час установлення нових потоків може швидко зростати із зростанням розмірів мережі.

◆ Проблема продуктивності: продуктивність мережі безпосередньо залежить від продуктивності контролера і його фізичних обмежень.

Одна з найбільш перспективних реалізацій підходу ПКМ — це технологія **OpenFlow**, що основним своїм документом має специфікацію OpenFlow

[4–6], в якій описуються головні компоненти OpenFlow мережі (рис. 2), принципи роботи та взаємодії компонентів (протокол OpenFlow). Стандартизуючою організацією для зазначеної специфікації є *Open Networking Foundation (ONF)*.

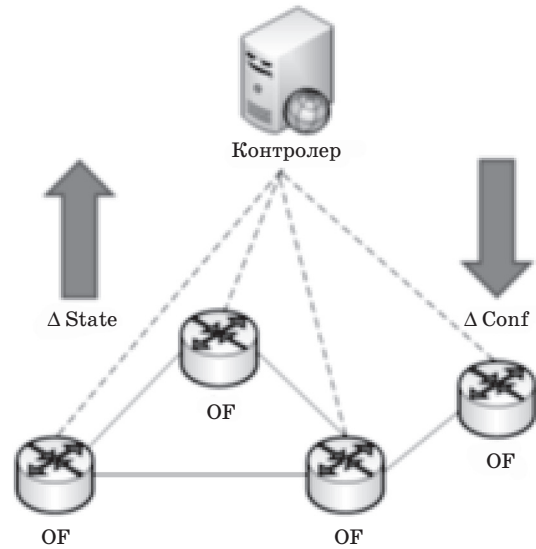


Рис. 2. Головні компоненти OpenFlow мережі

Згідно зі специфікацією головні компоненти OpenFlow мережі такі:

- контролер, який містить мережну операційну систему (ОС) та мережні додатки;
- OpenFlow комутатор;
- захищений канал між контролером і комутатором;
- протокол OpenFlow.

Загальний принцип функціонування OpenFlow мережі полягає в тому, що кожен OpenFlow комутатор встановлює захищений канал із контролером, за допомогою якого контролер реалізує свої керівні функції. Взаємодія між комутаторами та контролером забезпечується за допомогою повідомлень протоколу OpenFlow. Контролер отримує інформацію про зміну станів елементів у мережі, на основі якої він конфігурує мережне обладнання, керує мережною інфраструктурою та потоками даних у мережі.

Отже, як уже зазначалося, ключовий елемент у ПКМ — це *контролер* [8; 9]. Під контролером розуміють спеціальне ПЗ, установлене на фізичному сервері, що здійснює контроль і керування станом мережі та її елементами, а також керування потоками даних у мережі. Контролер складається з мережної ОС та набору мережних додатків, що функціонують поверх неї. Мережна ОС взаємодіє безпосередньо з елементами мережі (комутаторами), контролює та формує стан мережі на основі повідомлень від елементів мережі, уможливорює взаємодію додатків між собою, поширює керуючі впливи на елементи мережі, тобто здійснює керування мережними ресурсами. Мережні додатки, створені адміністратором мережі, використовую-

ють інформацію про стан мережі для безпосереднього керування трафіком (на основі здійснюваної політики, поточного завантаження мережі тощо). Таким чином, на контролері має бути встановлено хоча б один додаток. Нині це *learningswitch* — додаток, створений для всіх контролерів як базовий.

### Керування

#### програмно-конфігурованими мережами

Основна вимога до мережі полягає у виконанні тих функцій і наданні тих послуг, для яких її призначено. Наприклад, надання доступу до інтернет-ресурсів, ERP-системи підприємства, обмін електронною поштою, забезпечення IP-телефонії тощо. Таким чином, може йтися про ефективність керування мережною інфраструктурою системи та потоками даних у ній тільки в тому разі, якщо вона успішно виконує ті завдання, для яких було створено відповідну мережу.

Додаткові важливі вимоги, що висуваються до мереж, такі: *продуктивність, надійність, сумісність, керованість, захищеність, розширюваність і масштабованість*. Усі вони стосуються якості виконання мережею завдань і надання передбачених послуг [7]. Кожна з цих вимог визначається конкретними кількісними характеристиками. Проте ефективність керування мережною інфраструктурою та потоками даних у мережі характеризується, передусім, показниками продуктивності та надійності функціонування мережі.

Засоби керування мережами являють собою системи, на які покладено спостереження, контроль і керування кожним елементом мережі — від найпростіших пристроїв до найскладніших. Кожна така система розглядає мережу як єдине ціле, а не як розрізнений набір окремих пристроїв. Керованість мережі означає, що є змога централізовано контролювати стан основних елементів мережі, виявляти та розв'язувати проблеми, які виникають під час роботи мережі, аналізувати продуктивність і планувати розвиток мережі.

Система керування, що добре виконує свої функції, спостерігає за мережею і, виявивши проблему, активізує певну дію, виправляє ситуацію та інформує адміністратора про те, що сталося, і які кроки зроблено.

Водночас система керування має нагромаджувати дані, на підставі яких можна планувати розвиток мережі. Нарешті, система керування має бути незалежна від виробника і володіти зручним інтерфейсом, що дозволяє виконувати всі дії з однієї консолі.

Виконуючи тактичні завдання, адміністратори й технічний персонал щодня стикаються з проблемами забезпечення роботоздатності мережі. Ці завдання вимагають невідкладного виконання. Персонал, що обслуговує мережу, повинен оперативно реагувати на повідомлення про несправності, які

надходять від користувачів або автоматичних засобів керування мережею. Зі зростанням мережі загострюються загальні проблеми щодо продуктивності, конфігурування мережі, обробки збоїв та забезпечення безпеки даних, які вимагають стратегічного підходу, насамперед планування мережі з прогнозуванням змін у вимогах користувачів до мережі, із розв'язанням питань щодо застосування нових додатків, нових мережних технологій тощо.

Ключова роль системи керування особливо яскраво виявляється у великих мережах, корпоративних чи глобальних. За відсутності системи керування в таких мережах потрібна присутність кваліфікованих фахівців з експлуатації в кожній будівлі, де встановлено обладнання мережі, а це зрештою призводить до необхідності утримання величезного штату обслуговувального персоналу.

Нині щодо систем керування мережами маємо багато нерозв'язаних проблем. І досі бракує зручних, компактних і багатопрокольних засобів керування мережею. Адже більшість наявних засобів, по суті, не керують мережею, а всього лише здійснюють спостереження за її роботою, не вдаючись до активних дій навіть тоді, коли з мережею щось сталося або може статися. Маємо дефіцит масштабованих систем, здатних обслуговувати мережі від масштабу відділу до масштабу підприємства. Відчувається надмір систем, здатних керувати тільки окремими елементами мережі, не аналізуючи її здатності виконувати високоякісне передавання даних між кінцевими користувачами.

Завдяки системам керування відбувається перерозподіл навантаження при збоях обладнання, здійснюється оптимізація трафіку для підвищення віддачі від існуючих мереж і підтримується планомірний розвиток мережі за рахунок аналізу трафіку й моделювання майбутніх потреб користувачів та інформаційних систем.

Засоби керування та моніторингу стану інфраструктури дозволяють уникати втрат зв'язку чи зниження продуктивності мережних сервісів, забезпечуючи постійне відстеження руху трафіку в поєднанні з відповідними керівними впливами.

Таким чином, до основних характеристик *продуктивності* мережі належать:

- ◆ час реакції;
- ◆ швидкість передавання даних;
- ◆ пропускна здатність;
- ◆ затримка передавання та варіація цієї затримки.

*Час реакції мережі*. Зазвичай як часову характеристику продуктивності мережі використовують показник, названий часом реакції. Термін «час реакції» може вживатись у дуже широкому сенсі, тому в кожному конкретному випадку необхідно уточнити, що розуміється під цим терміном.

**Час реакції мережі** — це інтегральна характеристика її продуктивності з погляду користувача. Саме цю характеристику має на увазі користувач, коли говорить: «Сьогодні мережа працює повільно». Загалом час реакції визначається як часовий інтервал між виникненням запиту користувача до того чи іншого мережного сервісу та отриманням відповіді на цей запит (рис. 3). Вочевидь, зміст і значення цього показника залежать від типу сервісу, до якого звертається користувач, а також від поточного стану інших елементів мережі — завантаженості сегментів, через які проходить запит, завантаженості сервера та інших показників (яких саме — у даному контексті неістотно).

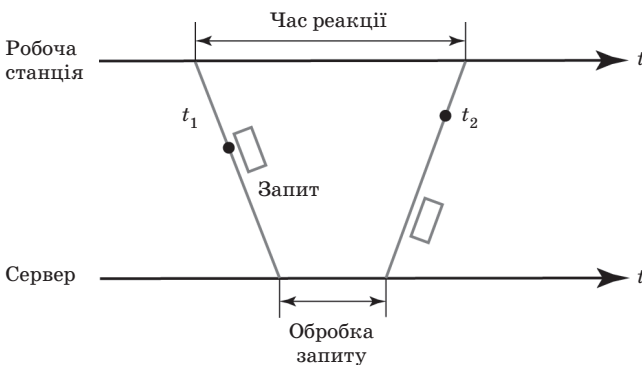


Рис. 3. Час реакції мережі

Тому має сенс використовувати також і середньозважену оцінку часу реакції мережі, беручи середній показник по користувачах, серверах і часом дня (від якого значною мірою залежить завантаження мережі).

При оцінюванні продуктивності мережі не щодо окремих пар вузлів, а щодо всіх вузлів загалом використовуються критерії двох типів: середньозважені і порогові.

**Середньозважений критерій** являє собою сумарний час реакції всіх або деяких вузлів при взаємодії з усіма або деякими серверами мережі за певним сервісом. Якщо усереднення проводиться і по сервісах, то додається ще одне підсумовування — за кількістю врахованих сервісів. Оптимізація мережі за цим критерієм полягає у відшуванні значень параметрів, при яких критерій досягає мінімуму або не перевищує деякого заданого числа.

**Пороговий критерій** характеризує найгірший час реакції з урахуванням усіх можливих комбінацій клієнтів, серверів і сервісів. Оптимізація може виконуватися також або з метою мінімізації критерію, або з метою досягнення ним деякого заданого значення, доцільного з практичного погляду.

Найчастіше застосовуються порогові критерії оптимізації, оскільки вони гарантують усім користувачам деякий задовільний рівень реакції мережі на їхні запити. Середньозважені критерії можуть дискримінувати тих користувачів, для

яких час реакції занадто великий, тоді як при усередненні отримується цілком прийнятний результат.

Продуктивність мережі може, як уже зазначалося, характеризуватися й швидкістю передавання даних. **Швидкість передавання даних** може бути миттєвою, максимальною і середньою.

- **Середня швидкість** обчислюється діленням загального обсягу переданих даних на час їх передавання, причому вибирається досить тривалий проміжок часу — година, день або тиждень.

- **Миттєва швидкість** відрізняється від середньої тим, що для усереднення вибирається дуже маленький проміжок часу — наприклад 10 мс або 1 с.

- **Максимальна швидкість** — це найбільша швидкість, зафіксована протягом періоду спостереження.

Найчастіше при проектуванні, налаштуванні та оптимізації мережі використовуються такі показники, як середня і максимальна швидкість. Середня швидкість, з якою обробляється трафік окремого елемента або мережі в цілому, дозволяє оцінити роботу мережі за тривалий час, протягом якого згідно із законом великих чисел піки і спади інтенсивності трафіку компенсують один одного. Максимальна швидкість дозволяє оцінити, як мережа буде справлятися з піковими навантаженнями, характерними для особливих періодів роботи, наприклад у ранкові години, коли співробітники підприємства майже одночасно реєструються в мережі і звертаються до файлів і баз даних. Зазвичай при визначенні швидкісних характеристик деякого сегмента або пристрою в переданих даних не виділяється трафік якогось певного користувача, додатка або комп'ютера — підраховується загальний обсяг переданої інформації. Проте для визначення точнішої оцінки якості обслуговування деталізація, про яку йдеться, бажана, і останнім часом системи управління мережами все частіше дозволяють її виконувати.

Головне завдання, для виконання якого будується мережа, — це швидке передавання інформації між комп'ютерами. Тому **пропускна здатність** вже не є, як, скажімо, час реакції або швидкість проходження даних по мережі, характеристикою, призначеною для користувача, оскільки вона стоєть швидкості виконання внутрішніх операцій мережі — передавання пакетів даних між вузлами мережі через різні комунікаційні пристрої. Натомість пропускна здатність безпосередньо характеризує якість виконання основної функції мережі — транспортування повідомлень, а отже, частіше використовується при аналізі продуктивності мережі, ніж час реакції або швидкість. Тому критерії, пов'язані з пропускною здатністю мережі або деякої її частини, достатньо добре відбивають якість функціонування мережі.

Зрештою пропускна здатність мережі залежить як від характеристик фізичного середовища передавання (мідний кабель, оптичне волокно, кручена пара), так і від прийнятого способу передавання даних (технологія Ethernet, FastEthernet, ATM). Пропускна здатність часто використовується як характеристика не стільки мережі, скільки власне технології, на якій побудовано мережу. Про важливість цієї характеристики для мережної технології свідчить, зокрема, і те, що її значення іноді стає частиною назви технології, наприклад 10 Мбіт/с Ethernet, 100 Мбіт/с Ethernet.

На відміну від часу реакції або швидкості передавання трафіку, пропускна здатність не залежить від завантаженості мережі і має постійне значення, залежне від використовуваних у мережі технологій.

На різних ділянках гетерогенної мережі, де задіяно кілька технологій, пропускна здатність може бути різною. Для аналізу та налаштування мережі дуже корисно мати відомості щодо пропускної здатності окремих її елементів. Варто наголосити, що через послідовний характер передавання даних різними елементами мережі загальна пропускна здатність будь-якого складеного маршруту в мережі дорівнює мінімальній пропускній здатності компонентів цього маршруту. Для підвищення пропускної здатності складеного шляху необхідно передусім звернути увагу на найповільніші елементи. Іноді корисно оперувати загальною пропускною здатністю мережі, що визначається як середня кількість інформації, переданої між усіма вузлами мережі за одиницю часу. Цей показник характеризує якість мережі загалом, без деталізації за окремими сегментами чи пристроями.

**Затримка передавання** визначається як затримка між моментом надходження даних на вхід того чи іншого мережного пристрою або частини мережі та моментом появи їх на виході цього пристрою. Цей параметр продуктивності за змістом близький до часу реакції мережі, але відрізняється тим, що завжди характеризує тільки мережні етапи обробки даних, без затримок обробки кінцевими вузлами мережі.

Зазвичай якість мережі характеризують такими показниками, як **максимальна затримка передавання** та **варіація затримки**. Утім не всі типи трафіку чутливі до затримок передавання. Насамперед це стосується затримок, характерних для комп'ютерних мереж, які здебільшого не перевищують сотень мілісекунд, рідше — кількох секунд. Такого порядку затримки пакетів, що породжуються файловою службою, службою електронної пошти або службою друку, мало впливають на якість цих служб із погляду користувача

мережі. Утім такі самі затримки пакетів, що переносять голосові чи відеодані, можуть призводити до значного зниження якості інформації, наприклад до появи ефекту «луни», нерозбірливості мови, вібрації зображення тощо.

Як бачимо, ключові завдання систем керування ПКМ полягають у забезпеченні необхідного рівня продуктивності та надійності функціонування мережі, а ефективність здійснюваного ними керування визначається показниками продуктивності та надійності мережі. Окрім того, як характеристики ефективності керування можуть розглядатись економічні показники, наприклад вартість обслуговування мережної інфраструктури, вартість надання тих чи інших послуг. Завдяки використанню найбільш просунутих систем керування вартість обслуговування та вартість послуг вдається знижувати.

Насамкінець зазначимо, що характеристики продуктивності та надійності комп'ютерних мереж прямо пов'язані між собою. Адже ненадійна робота мережі дуже часто призводить до істотного зниження її продуктивності. Річ у тім, що збої та відмови каналів зв'язку й комунікаційного устаткування призводять до втрати чи спотворення деякої частини пакетів, а тому комунікаційним протоколам доводиться організовувати повторне передавання втрачених даних. А оскільки в локальних мережах відновлення втрачених даних покладено, як правило, на протоколи транспортного або прикладного рівня, що працюють із тайм-аутами в кілька десятків секунд, то втрати продуктивності через низьку надійність мережі можуть становити сотні відсотків. Тому необхідно враховувати надійність ПКМ і всі пов'язані з надійністю показники.

### Висновки

Обґрунтування та вибір критеріїв ефективності керування мережною інфраструктурою ПКМ залежать від цілей керування, особливостей середовища (WAN, мережа ЦОД, корпоративна мережа), характеристик користувачів, мережного трафіку та ще цілої низки чинників. Головна мета функціонування ПКМ — передавання інформації, тому як ключові показники розглядаються швидкість, обсяги та якість передавання. Відповідно, чим ефективніше використовуються алгоритми керування мережною інфраструктурою та потоками даних, тим вищі ці показники.

Створення ПКМ дозволить відокремити рівень управління мережним устаткуванням від рівня управління передавання даних, забезпечивши програмно-керований інтерфейс між мережними додатками та транспортним середовищем, а також перехід від управління окремим устаткуван-

ням до управління мережею в цілому. Концепцію ПКМ адаптовано до стрімкого зростання обсягів трафіку й зміни його структури, до масштабування віртуальних середовищ та інших хмарних сервісів.

Сьогодні, коли постала необхідність зміни традиційних неефективних схем адресацій, логічного поділу мереж і способів обробки трафіку в мультисервісних мережах, саме реалізація концепції ПМК дозволяє створювати додатки для керування мережею. При цьому вся мережа, що має різнопланову структуру, постає для додатка як один логічний комутатор.

### Література

1. **Openflow: Enabling innovation in campus networks** / [N. McKeown, T. Anderson, H. Balakrishnan a. o.] // SIGCOMM CCR.— 2008.— Vol. 38, no. 2.— P. 69–74.

2. **OpenFlow Switch Specification** [Електронний ресурс].— Режим доступу:

<http://www.openflow.org/documents/openflow-specv1.1.0.pdf>.

3. **Software-Defined Networking: The New Norm for Networks** [Електронний ресурс] // Open Networking Foundation.— 2012.— Режим доступу:

<https://www.opennetworking.org/images/stories/downloads/white-papers/wp-sdnnewnorm.pdf> (accessed date: 28.04.2013).

4. **OpenFlow Switch Specification, Version 1.0.0 (Wire Protocol 0x01)** [Електронний ресурс].— 2009.— Режим доступу:

<https://www.opennetworking.org/images/stories/downloads/sdn-resources/onfspecifications/openflow/openflow-spec-v1.0.0.pdf> (accessed date: 28.04.2013).

5. **OpenFlow Switch Specification, Version 1.1.0 (Wire Protocol 0x02)** [Електронний ресурс] // Open Networking Foundation.— 2011.— Режим доступу:

<https://www.opennetworking.org/images/stories/downloads/sdn-resources/onfspecifications/openflow/openflow-spec-v1.1.0.pdf> (accessed date: 28.04.2013).

6. **OpenFlow Switch Specification, Version 1.2.0 (Wire Protocol 0x03)** [Електронний ресурс] // Open Networking Foundation.— 2011.— Режим доступу:

<https://www.opennetworking.org/images/stories/downloads/sdn-resources/onfspecifications/openflow/openflow-spec-v1.1.0.pdf> (accessed date: 28.04.2013).

7. **Смелянский, Р. Л.** Компьютерные сети: учебник для студ. высш. учеб. заведений в 2 т. Т. 2 / Р. Л. Смелянский.— М.: Издат. центр «Академия», 2011.— 240 с.

8. **D. Nadeau, Thomas SDN: Software Defined Networks / Thomas D. Nadeau, Ken Gray** // An Authoritative Review of Network Programmability Technologies O'Reilly Media, 2013.— 384 p.

9. **Software-defined networking** — електронні тестові дані [Електронний ресурс].— Режим доступу:

[http://en.wikipedia.org/wiki/Software-defined\\_networking](http://en.wikipedia.org/wiki/Software-defined_networking).

Л. Н. Беркман, О. А. Кильменинов, О. А. Лещенко, И. Э. Похабова

### ПРОГРАММНО-КОНФИГУРИРУЕМЫЕ СЕТИ: МЕТОДЫ ПОСТРОЕНИЯ И УПРАВЛЕНИЯ

Описана архитектура программно-конфигурируемых сетей, обеспечивающих реализацию принципиально нового подхода к построению и обеспечению функционирования сети, с разделением механизмов управления и маршрутизации. Проанализированы преимущества и недостатки указанного подхода в сравнении с традиционной архитектурой сети. Рассмотрены основные компоненты сетей на основе технологии OpenFlow. Обоснован выбор критериев эффективности управления инфраструктурой указанных сетей.

**Ключевые слова:** программно-конфигурируемая сеть; SDN, оптимизация; критерии эффективности.

L. N. Berkman, O. A. Kilmenniv, O. A. Leshchenko, I. E. Pohabova

### METHODS OF CONSTRUCTING AND MANAGING SOFTWARE-DEFINED NETWORKS

In the article is considered the description of the architecture of software-defined network (SDN), the analysis of the advantages and disadvantages of the new approach and the problems of traditional network architecture. The main components of the network technology based on OpenFlow. The approaches to the organization of management in SDN are considered. It justifies the choice of performance criteria of SDN infrastructure management.

**Keywords:** software-defined network; SDN; optimization; performance criteria.